

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO  
EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

Emanoelli Cipriani

**ANÁLISE DE OBSERVABILIDADE E CRITICIDADE DE  
MEDIDAS NA ESTIMAÇÃO DE ESTADOS EM SISTEMAS DE  
POTÊNCIA CONSIDERANDO MEDIÇÕES FASORIAIS  
SINCRONIZADAS**

Dissertação submetida à Universidade Federal de Santa Catarina como parte dos requisitos para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Antonio José Alves Simões Costa, Ph.D.

Florianópolis  
2010

## Catálogo na fonte elaborada pela biblioteca da Universidade Federal de Santa Catarina

C577a Cipriani, Emanoelli

Análise de observabilidade e criticidade de medidas na  
estimação de estados em sistemas de potência considerando  
medições fasoriais sincronizadas [dissertação] / Emanoelli  
Cipriani ; orientador, Antônio José Alves Simões Costa.  
- Florianópolis, SC, 2010.

129 p.: il., tabs.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa  
Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Elétrica.

Inclui referências

1. Engenharia elétrica. 2. Sistemas de potência. 3.  
Medição. I. Costa, Antonio Jose Alves Simões. II. Universidade  
Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Elétrica. III. Título.

CDU 621.3

Emanoelli Cipriani

**ANÁLISE DE OBSERVABILIDADE E CRITICIDADE DE  
MEDIDAS NA ESTIMAÇÃO DE ESTADOS EM SISTEMAS DE  
POTÊNCIA CONSIDERANDO MEDIÇÕES FASORIAIS  
SINCRONIZADAS**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Sistemas de Energia Elétrica, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina.

Florianópolis, 24 de novembro de 2010.

---

Prof. Roberto de Souza Salgado, Ph.D.  
Coordenador do Curso

**Banca Examinadora:**

---

Prof. Antonio José Alves Simões Costa, Ph.D.  
Orientador  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof. Luís Fernando Costa Alberto, Dr.  
Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo

---

Prof. Hans Helmut Zürn, Ph.D.  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof. Roberto de Souza Salgado, Ph.D.  
Universidade Federal de Santa Catarina



*Para Antonio, com amor.*



## **AGRADECIMENTOS**

Ao professor Antonio José Alves Simões Costa, pela inestimável orientação, pelos ensinamentos e pela confiança depositada em mim.

Aos membros da banca examinadora, professor Luís Fernando Costa Alberto, professor Hans Helmut Zürn e professor Roberto de Souza Salgado, pelas valiosas contribuições.

Ao meu esposo Antonio, pela compreensão e grandioso apoio na realização deste trabalho.

Aos meus pais Avelino e Terezinha, pelo incentivo constante à busca de meus ideais.

Ao meu irmão Ricardo, grande companheiro de todos os momentos.

A toda minha família, por estar sempre presente e torcer por meu sucesso.

Aos amigos da Celesc Distribuição, Daimon Engenharia e Sistemas e Eletrobras Eletrosul, em especial a Ricardo Hinnig da Silva, André Meffè e Luiz Fabio Fraporti da Silva, pelo apoio em diversas etapas deste trabalho.

A André, Daniel, Flávio, Leonardo, Nastasha e Patrícia, pelo apoio, amizade e contribuições em um momento muito importante.

Aos colegas, funcionários e professores do Labspot e Labplan, pelo auxílio e amizade.





Resumo da Dissertação apresentada à UFSC como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

**ANÁLISE DE OBSERVABILIDADE E CRITICIDADE DE  
MEDIDAS NA ESTIMAÇÃO DE ESTADOS EM SISTEMAS DE  
POTÊNCIA CONSIDERANDO MEDIÇÕES FASORIAIS  
SINCRONIZADAS**

**Emanoelli Cipriani**

Novembro/2010

Orientador: Prof. Antonio José Alves Simões Costa, Ph.D.

Área de Concentração: Sistemas de Energia Elétrica

Palavras-chave: Sistemas de Medição Fasorial Sincronizada, Estimação de Estados em Sistemas de Potência, Observabilidade, Medidas Críticas.

Número de Páginas: 129

Este trabalho de dissertação aborda os impactos da inclusão das medidas fasoriais sincronizadas de tensão e de corrente na análise de observabilidade e criticidade de medidas na Estimação de Estados em Sistemas de Potência. É proposta a extensão de um eficiente algoritmo combinatório de análise de observabilidade topológica e criticidade a fim de considerar a presença de medidas fasoriais sincronizadas no plano de medição, além de medidas convencionais. Apresenta-se ao longo do trabalho uma revisão qualitativa dos principais conceitos da estimação de estados, observabilidade topológica bem como uma introdução aos sistemas de medição fasorial sincronizada. Faz-se necessária também uma descrição dos fundamentos da teoria de matrôides utilizada na solução dos problemas de análise de observabilidade topológica e de criticidade de medidas. Por fim, discute-se o tratamento proposto às medidas fasoriais sincronizadas de tensão e corrente de modo a permitir sua incorporação ao plano de medição e processamento pelo algoritmo combinatório de análise de observabilidade topológica e criticidade de medidas. Os resultados de simulação obtidos com os sistemas-teste IEEE de 14, 30, 57 e 118 barras atestam o adequado desempenho da extensão da metodologia proposta e são detalhadamente apresentados nesta dissertação.



Abstract of Dissertation presented to UFSC as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Electrical Engineering.

**OBSERVABILITY AND MEASUREMENT CRITICALITY  
ANALYSIS ON POWER SYSTEM STATE ESTIMATION  
CONSIDERING SYNCHRONIZED PHASOR MEASUREMENTS**

**Emanoelli Cipriani**

November/2010

Advisor: Prof. Antonio José Alves Simões Costa, Ph.D.

Area of Concentration: Electric Energy Systems

Keywords: Synchronized Phasor Measurement Systems; Power System State Estimation, Observability, Critical Measurements.

Number of Pages: 129

This thesis investigates the impacts of voltage and current synchronized phasor measurements on observability and measurement criticality analysis on Power System State Estimation. It is proposed an extension of an efficient combinatorial algorithm for observability and criticality analysis in order to allow, in addition to conventional measurements, voltage and current phasor measurement processing. During this work, a qualitative review of the main concepts related to state estimation and topological observability is presented, as well as an introduction to the synchronized phasor measurement systems. The fundamentals of matroid theory, which is used in the solution of topological observability analysis and measurement criticality problems, are also described. Finally, the proposed treatment applied to the synchronized voltage and current phasor measurements in order to allow their inclusion in the measurement plan and processing by the combinatorial algorithm is discussed. Simulation results obtained for several case studies based on the 14-bus, 30-bus, 57-bus and 118-bus IEEE test systems validate the proposed methodology and are presented in detail in this thesis.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Sistema de 4 Barras: Plano de Medição $P-\delta$ .....	39
Figura 2.2 – Sistema de 4 Barras: Possíveis Associações de Medidas a Arestas .....	39
Figura 2.3 – Sistema de 4 Barras: Possível AGO.....	40
Figura 3.1 – Grafo Bipartido $G_b(V_1, V_2)$ .....	47
Figura 3.2 – Grafo Exemplo.....	49
Figura 3.3 – Exemplo de Matróide de Partição e um de Seus Conjuntos Independentes .....	50
Figura 3.4 – Grafo Bipartido Auxiliar $H(V_1, V_2)$ .....	53
Figura 3.5 – Grafo Bipartido Auxiliar $H_1(V_1, V_2)$ com Duas Sequências de Troca .....	54
Figura 3.6 – Grafo Bipartido Auxiliar $H_2(V_1, V_2)$ com Uma Sequência de Troca .....	54
Figura 3.7 – Sistema Exemplo: Plano de Medição $P-\delta$ .....	57
Figura 3.8 – Sistema Exemplo: Grafo de Medição $P-\delta$ .....	57
Figura 3.9 – Sistema Exemplo: AGO 1.....	57
Figura 3.10 – Sistema Exemplo: AGO 2.....	58
Figura 3.11 – Algoritmo de Busca da AGO para Análise de Observabilidade Topológica .....	60
Figura 4.1 – Estrutura Geral de um SMFS (Ehrensperger, 2004).....	68
Figura 4.2 – Estrutura Básica da UMF (Ehrensperger, 2004).....	70
Figura 4.3 – Funções Básicas do Concentrador de Dados (Ehrensperger, 2004) .....	71
Figura 5.1 – Estrutura da Matriz Jacobiana (Zhu e Abur, 2007).....	81
Figura 5.2 – Submatriz $H_{QV}$ .....	83
Figura 5.3 – Submatriz $H_{QV}'$ .....	83

Figura 5.4 – Sistema de 6 Barras: Plano de Medição $Q-V$ .....	84
Figura 5.5 – Sistema de 6 Barras: Associações de Medidas a Arestas ...	84
Figura 5.6 – Submatriz $H_{p\delta}$ .....	85
Figura 5.7 – Submatriz $H_{p\delta}'$ .....	85
Figura 5.8 – Detalhamento da Estrutura da Matriz Jacobiana para $I \angle \theta$ e $T, U$ .....	86
Figura 6.1 – Sub-rotinas Chamadas pelo Programa Principal .....	93
Figura 6.2 – Sub-rotinas Utilizadas em GRAMED .....	94
Figura 6.3 – Sub-rotinas Utilizadas em MEDCRT .....	95
Figura 6.4 – Sub-rotinas Utilizadas em PCINJ e PCFLOW .....	96
Figura 6.5 – Interface Gráfica Desenvolvida .....	97
Figura 6.6 – Exemplo de Utilização da Interface Gráfica.....	99
Figura 7.1 – Diagrama Unifilar do Sistema IEEE 14 Barras .....	102
Figura 7.2 – Caso 1: AGO do Sistema IEEE 14 Barras Fornecida pelo PLAMED-F .....	104
Figura 7.3 – Diagrama Unifilar do Sistema IEEE 30 Barras .....	105
Figura 7.4 – Diagrama Unifilar do Sistema IEEE 57 Barras .....	109
Figura 7.5 – Diagrama Unifilar do Sistema IEEE 118 Barras .....	112

## LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Lista das Medidas do SMFS e SCADA.....	74
Tabela 7.1 – Planos de Medição para o Sistema IEEE 14 Barras .....	103
Tabela 7.2 – Resultados da Análise de Criticidade para o Sistema IEEE 14 Barras .....	103
Tabela 7.3 – Planos de Medição para o Sistema IEEE 30 Barras .....	106
Tabela 7.4 – Resultados da Análise de Observabilidade e Criticidade para o Sistema IEEE 30 Barras .....	107
Tabela 7.5 – Planos de Medição para o Sistema IEEE 57 Barras .....	110
Tabela 7.6 – Resultados da Análise de Criticidade para o Sistema IEEE 57 Barras .....	110
Tabela 7.7 – Planos de Medição para o Sistema IEEE 118 Barras .....	112
Tabela 7.8 – Resultados da Análise de Criticidade para o Sistema IEEE 118 Barras .....	113
Tabela 7.9 – Tempo de CPU Consumido para os Sistemas IEEE de 57 e 118 Barras .....	114





# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>21</b>
<b>1.1</b>	<b>Introdução.....</b>	<b>21</b>
<b>1.2</b>	<b>Revisão Bibliográfica.....</b>	<b>23</b>
1.2.1	Estimação de Estados em Sistemas de Potência .....	23
1.2.2	Sistemas de Medição Fasorial Sincronizada .....	24
<b>1.3</b>	<b>Contribuições deste Trabalho.....</b>	<b>26</b>
<b>1.4</b>	<b>Organização da Dissertação.....</b>	<b>26</b>
<b>2</b>	<b>ESTIMAÇÃO DE ESTADOS EM SISTEMAS DE POTÊNCIA .....</b>	<b>29</b>
<b>2.1</b>	<b>Introdução.....</b>	<b>29</b>
<b>2.2</b>	<b>Formulação Matemática do Problema de EESP.....</b>	<b>29</b>
2.2.1	Modelo de Medição Não-Linear .....	29
2.2.2	Formulação da EESP por Mínimos Quadrados Ponderados .....	31
2.2.3	Solução do Problema de EESP pelo Método de Gauss-Newton.....	31
<b>2.3</b>	<b>Processamento de Erros Grosseiros .....</b>	<b>32</b>
<b>2.4</b>	<b>Observabilidade de Sistemas Elétricos de Potência.....</b>	<b>34</b>
2.4.1	Definição de Observabilidade.....	34
2.4.2	Observabilidade $P$ - $\delta$ e $Q$ - $V$ .....	36
2.4.3	Observabilidade Topológica .....	37
<b>2.5</b>	<b>Análise de Criticidade de Medidas.....</b>	<b>40</b>
2.5.1	Medidas Críticas .....	40
2.5.2	Conjuntos Críticos .....	41
<b>2.6</b>	<b>Estimação de Estados em Sistemas com Planos de Medição Deficientes .....</b>	<b>42</b>
<b>2.7</b>	<b>Conclusões.....</b>	<b>43</b>
<b>3</b>	<b>MÉTODO TOPOLÓGICO DE ANÁLISE DE OBSERVABILIDADE .....</b>	<b>45</b>
<b>3.1</b>	<b>Introdução.....</b>	<b>45</b>
<b>3.2</b>	<b>Conceitos Matemáticos.....</b>	<b>46</b>
3.2.1	Notação .....	46
3.2.2	Definições Preliminares .....	46
<b>3.3</b>	<b>Teoria de Matróides .....</b>	<b>47</b>

3.3.1	Definição de Matróides.....	47
3.3.2	Matróide de Partição.....	49
3.3.3	Interseção de Matróides.....	51
3.3.4	Método de Interseção de Matróides (Frank, 1981; Piazza, 1989).....	52
3.3.5	Determinação de Elementos Críticos de Interseção de Matróides (Piazza, 1989).....	54
<b>3.4</b>	<b>Aplicação da Teoria de Matróides ao Problema de Observabilidade.....</b>	<b>56</b>
3.4.1	Formulação do Problema Utilizando o Grafo de Medição.....	56
3.4.2	Método de Busca de uma Árvore Geradora Observável no Grafo de Medição.....	58
<b>3.5</b>	<b>Aplicação da Teoria de Matróides ao Problema de Criticidade de Medidas.....</b>	<b>62</b>
3.5.1	Determinação de Medidas Críticas.....	62
3.5.2	Determinação de Conjuntos Críticos.....	63
<b>3.6</b>	<b>Conclusões.....</b>	<b>64</b>
<b>4</b>	<b>TECNOLOGIA DO SISTEMA DE MEDIÇÃO FASORIAL SINCRONIZADA.....</b>	<b>67</b>
<b>4.1</b>	<b>Introdução.....</b>	<b>67</b>
<b>4.2</b>	<b>Desenvolvimento da Tecnologia do Sistema de Medição Fasorial Sincronizada.....</b>	<b>67</b>
<b>4.3</b>	<b>Estrutura do Sistema de Medição Fasorial Sincronizada.....</b>	<b>68</b>
4.3.1	Fonte de Sincronização GPS.....	69
4.3.2	Unidade de Medição Fasorial.....	70
4.3.3	Concentrador de Dados.....	70
4.3.4	Canais de Comunicação.....	71
<b>4.4</b>	<b>Aplicações da Tecnologia de Medição Fasorial Sincronizada.....</b>	<b>72</b>
<b>4.5</b>	<b>Utilização do Sistema de Medição Fasorial Sincronizada na Estimação de Estados.....</b>	<b>73</b>
4.5.1	Estimadores Convencionais <i>versus</i> Estimadores Utilizando Medidas Fasoriais Sincronizadas.....	73
4.5.2	Referência Angular na Estimação de Estados com Medidas Fasoriais Sincronizadas.....	75
4.5.3	Considerações sobre Erros em Medidas Fasoriais Sincronizadas.....	76
4.5.4	Diferentes Tipos de Medidas Fasoriais de Corrente.....	77
4.5.5	Diferentes Estruturas para a Inclusão de Medidas Fasoriais Sincronizadas na Estimação de Estados.....	77
<b>4.6</b>	<b>Conclusões.....</b>	<b>78</b>

<b>5</b>	<b>OBSERVABILIDADE DE REDES ELÉTRICAS E CRITICIDADE DE MEDIDAS NA PRESENÇA DE MEDIÇÕES FASORIAIS SINCRONIZADAS.....</b>	<b>79</b>
<b>5.1</b>	<b>Introdução.....</b>	<b>79</b>
<b>5.2</b>	<b>Impacto das Medidas Fasoriais Sincronizadas sobre a Observabilidade.....</b>	<b>79</b>
<b>5.3</b>	<b>Tratamento das Medidas Fasoriais de Tensão e Corrente na Análise de Observabilidade.....</b>	<b>81</b>
5.3.1	Modelagem de Medidas de Ângulo de Fase das Tensões Nodais.....	82
5.3.2	Modelagem de Medidas Fasoriais de Corrente.....	86
<b>5.4</b>	<b>Extensão do Algoritmo de Observabilidade Topológica e Criticidade de Medidas.....</b>	<b>88</b>
5.4.1	Extensão do Algoritmo de Análise Topológica de Observabilidade.....	88
5.4.2	Extensão da Análise de Criticidade para o Tratamento de Medidas Fasoriais Sincronizadas.....	89
5.4.3	Considerações Adicionais.....	89
<b>5.5</b>	<b>Conclusões.....</b>	<b>90</b>
<b>6</b>	<b>IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL.....</b>	<b>91</b>
<b>6.1</b>	<b>Introdução.....</b>	<b>91</b>
<b>6.2</b>	<b>Dados de Entrada e Saída.....</b>	<b>91</b>
6.2.1	Dados de entrada.....	91
6.2.2	Dados de Saída.....	92
<b>6.3</b>	<b>Implementação Computacional do Algoritmo de Observabilidade Topológica e Criticidade de Medidas.....</b>	<b>93</b>
6.3.1	Análise da Observabilidade Topológica.....	93
6.3.2	Análise de Criticidade de Medidas.....	95
6.3.3	Determinação de Conjuntos Críticos.....	96
<b>6.4</b>	<b>Ambiente de Programação e Interface Gráfica.....</b>	<b>96</b>
6.4.1	Ambiente de Programação.....	96
6.4.2	Interface Gráfica Desenvolvida.....	97
<b>6.5</b>	<b>Conclusões.....</b>	<b>99</b>
<b>7</b>	<b>SIMULAÇÕES E RESULTADOS.....</b>	<b>101</b>
<b>7.1</b>	<b>Introdução.....</b>	<b>101</b>
<b>7.2</b>	<b>Resultados Obtidos para o Sistema IEEE 14 Barras.....</b>	<b>102</b>
<b>7.3</b>	<b>Resultados Obtidos para o Sistema IEEE 30 Barras.....</b>	<b>105</b>
<b>7.4</b>	<b>Resultados Obtidos para o Sistema IEEE 57 Barras.....</b>	<b>108</b>

<b>7.5</b>	<b>Resultados Obtidos para o Sistema IEEE 118 Barras.....</b>	<b>111</b>
<b>7.6</b>	<b>Avaliação do Esforço Computacional.....</b>	<b>113</b>
<b>7.7</b>	<b>Conclusões.....</b>	<b>114</b>
<b>8</b>	<b>CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS .....</b>	<b>117</b>
<b>8.1</b>	<b>Conclusões Finais .....</b>	<b>117</b>
<b>8.2</b>	<b>Sugestões para Futuros Trabalhos.....</b>	<b>119</b>
<b>9</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>121</b>

## **CAPÍTULO 1**

### **INTRODUÇÃO**

#### **1.1 INTRODUÇÃO**

A segurança operativa do sistema elétrico de potência depende da disponibilidade de informações confiáveis em tempo real a respeito do ponto de operação do sistema. Os valores das variáveis de estado do sistema, tensões nodais complexas, são dados de entrada necessários para diversos aplicativos empregados na operação em tempo real do sistema elétrico.

O Estimador de Estados é a ferramenta responsável pelo processamento de um conjunto redundante de telemidas, obtidas de diversos pontos do sistema elétrico e corrompidas por erros de medição, erros de conversão analógico-digital e ruídos de transmissão, de modo a estimar valores confiáveis para as variáveis de estado do sistema em todas as condições de operação. Portanto, o Estimador de Estado é imprescindível para todas as ações de controle e operação em tempo real.

A detecção e identificação de medidas portadoras de erros grosseiros é um dos principais atributos do Estimador de Estados. O processamento de erros grosseiros faz uso da redundância de medidas disponível no plano de medição e de testes estatísticos aplicados aos resíduos de estimação.

Dentre outros fatores, o desempenho adequado do Estimador de Estados, inclusive no que tange à capacidade de processamento de erros grosseiros, depende do plano de medição disponível: número, tipo e localização dos medidores instalados no sistema elétrico de potência (Monticelli e Wu, 1986). Um requisito básico do plano de medição é fornecer informação suficiente para permitir a estimação de estados do sistema, isto é, assegurar sua observabilidade. O nível de redundância do

plano de medição, por sua vez, determinará a existência ou não de medidas críticas e conjuntos críticos.

A determinação de medidas e conjuntos críticos é importante na Estimação de Estados de Sistemas de Potência (EESP) tanto para indicar pontos de reforço no plano de medição, uma vez que a eliminação de uma medida crítica inviabiliza a estimação de estados por tornar o sistema não observável, quanto no processamento de erros grosseiros. Erros grosseiros em medidas críticas são não-detectáveis (Clements, Krumpholz e Davis, 1981), ao passo que em medidas pertencentes a um conjunto crítico são não-identificáveis (Mili, Van Cutsem e Ribbens Pavella, 1984).

Tradicionalmente, as medidas utilizadas pela EESP, quais sejam, magnitudes de tensões nodais, injeções de potência ativa e reativa nas barras e fluxos de potência ativa e reativa nos ramos da rede, são obtidas através do sistema SCADA (*Supervisory Control And Data Acquisition*).

Com o surgimento da tecnologia do Sistema de Medição Fasorial Sincronizada (SMFS), medidas fasoriais sincronizadas de tensão e de corrente passam a ser incorporadas aos planos de medição. O SMFS apresenta potencial melhoria no processo de EESP no que diz respeito à precisão e convergência do método e confiabilidade dos resultados (Thorp, Phadke e Karimi, 1985; Zivanovic e Cairns, 1996). As medidas fasoriais sincronizadas apresentam alta exatidão e taxas de amostragem muito superiores àquelas do sistema SCADA. Além disso, a medição direta dos ângulos de fase das tensões nodais, inviável no sistema SCADA, é de grande importância para a EESP, já que estas são variáveis de estado a serem estimadas.

Apesar do grande impacto positivo resultante do surgimento da tecnologia do SMFS para o Estimador de Estados, os atuais sistemas de medição não serão completamente substituídos por Unidades de Medição Fasorial (UMFs) em um curto período de tempo. Portanto, faz-se necessário que a formulação clássica da EESP e os subproblemas associados, como a determinação da observabilidade do sistema de potência e a identificação de medidas e conjuntos críticos, sejam adaptados para incorporar as medidas fasoriais de tensão e de corrente oriundas das UMFs.

Nesta dissertação, propõe-se a extensão do algoritmo de observabilidade topológica e do método de determinação de medidas e conjuntos críticos desenvolvidos, respectivamente, por Quintana, Simões Costa e Mandel (1982) e Simões Costa, Piazza e Mandel (1990), visando à solução dos problemas de observabilidade e criticidade de

medidas na EESP na presença das medidas fasoriais sincronizadas de tensão e de corrente no plano de medição.

## 1.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 1.2.1 Estimação de Estados em Sistemas de Potência

O processo de EESP foi inicialmente proposto por Schweppe com a publicação de um artigo de três partes (Schweppe, Wildes e Rom, 1970). O artigo aborda a natureza geral da Estimação de Estados, a modelagem matemática exata do problema, um modelo aproximado, técnicas iterativas de solução e conceitos relacionados à detecção e identificação de medidas portadoras de erros grosseiros. A forte relação entre o plano de medição e o desempenho do Estimador de Estados foi reconhecida pelos autores na primeira parte do artigo.

A análise de observabilidade do sistema tem sido tema de pesquisa desde a publicação dos primeiros trabalhos sobre Estimação de Estados em Sistemas de Potência. Clements e Wollenberg (1975) propõem um método de avaliação da observabilidade a partir da topologia do sistema e das leis de Kirchhoff, sem exigir cálculos numéricos para efetuar a análise. O método, que utiliza princípios heurísticos extraídos da experiência na análise de redes elétricas de potência dos autores, apresenta resultados conservadores (Allemong, Irisarri e Sasson, 1980). Entretanto, introduz técnicas e conceitos importantes para análise da observabilidade topológica, como o de ilhas observáveis, contribuindo sobremaneira com o desenvolvimento de trabalhos subseqüentes acerca do tema.

O trabalho de Krumpholz, Clements e Davis (1980) apresenta um algoritmo de análise de observabilidade topológica baseado em relações precisas entre o modelo de medição e a teoria de grafos, segundo as quais um sistema de potência é topologicamente observável com respeito a um plano de medição se existir uma árvore geradora observável. Os conceitos de observabilidade algébrica, numérica e topológica também foram introduzidos neste trabalho, bem como a demonstração da equivalência da observabilidade algébrica e topológica para todas as situações práticas.

Em (Quintana, Simões Costa e Mandel, 1982) a formulação do problema de observabilidade topológica considera um modelo de medição desacoplado linear e a busca de uma árvore geradora observável através do uso de um método de interseção de matrôides, que

tem base matemática sólida e apresenta características favoráveis à solução do problema. A floresta observável maximal é fornecida pelo algoritmo caso o sistema seja não-observável.

Monticelli e Wu (1985a) propõem um método numérico para análise de observabilidade que se baseia na fatoração triangular da matriz ganho ao longo do processo iterativo de solução do problema de estimação de estados. Caso o sistema seja não-observável, um método para identificar ilhas observáveis e selecionar pseudomedidas capazes de recuperar a observabilidade é apresentado pelos mesmos autores (Monticelli e Wu, 1985b).

No que diz respeito ao processamento de erros grosseiros, Clements, Krumpholz e Davis (1981) provaram que somente medidas não-críticas apresentam resíduos de estimação detectáveis. Os autores propõem um método para determinação de medidas críticas e destacam a relevância da determinação das mesmas na avaliação da confiabilidade do plano de medição disponível. Em (Van Cutsem, 1985) também são definidas as propriedades das medidas críticas e proposto um método topológico enumerativo para sua determinação.

No trabalho de Mili, Van Cutsem e Ribbens Pavella (1984) foi demonstrado que os resíduos normalizados das medidas pertencentes a conjuntos críticos são iguais, o que implica na não-identificabilidade de medidas portadoras de erro grosseiro pertencentes a estes conjuntos. Ayres e Haley (1986) propõem dois algoritmos para a determinação de conjuntos críticos: o primeiro baseia-se nas propriedades topológicas de conjuntos críticos; o segundo método fundamenta-se em certas propriedades numéricas da submatriz de covariância dos resíduos associada a um conjunto crítico. No entanto, ambos os algoritmos empregam testes envolvendo resíduos normalizados e estão expostos a dificuldades inerentes à utilização de cálculos em ponto flutuante.

Simões Costa, Piazza e Mandel (1990) propõem uma extensão do algoritmo de observabilidade topológica apresentado por Quintana, Simões Costa e Mandel (1982) para recuperação de planos de medição deficientes e determinação de medidas críticas e conjuntos críticos.

## **1.2.2 Sistemas de Medição Fasorial Sincronizada**

Os trabalhos pioneiros na tecnologia de medição fasorial sincronizada datam da década de 80. Thorp, Phadke e Karimi (1985) e Phadke, Thorp e Karimi (1986) relatam o desenvolvimento de um relé de distância SCDR (*Symmetrical Component Distance Relay*) capaz de obter medidas fasoriais de tensão e de corrente. No entanto, os sistemas



de sincronização disponíveis são ainda incipientes e não atendem plenamente os requisitos de precisão desejados. Partindo do algoritmo do SCDR, foi desenvolvido em 1988, pelos pesquisadores da universidade *Virginia Polytechnic Institute and State University* (Virginia Tech), nos Estados Unidos, o primeiro protótipo de Unidade de Medição Fasorial (UMF). Baseando-se neste protótipo, a empresa Macrodyne começou a fabricar UMFs comercialmente (Phadke, 2002).

O advento do GPS (*Global Positioning System*) tornou possível a sincronização precisa das medidas fasoriais de instalações geograficamente distantes através do sinal de pulso por segundo e da etiqueta de tempo, com a data no formato completo, disponibilizados pelos equipamentos receptores de sinal GPS (Phadke, 2002).

O surgimento da tecnologia de medição fasorial sincronizada e sua utilização crescente nos sistemas de potência modernos representam uma mudança de paradigma para diversas áreas de monitoração e controle da operação dos sistemas elétricos de potência. O campo de aplicação desta tecnologia é amplo, engloba problemas de natureza estática e dinâmica, e vem sendo estudado em âmbito mundial.

Desde os estudos iniciais com medidas fasoriais sincronizadas foram discutidos os impactos desta tecnologia no contexto da EESP. Thorp, Phadke e Karimi (1985) e Phadke, Thorp e Karimi (1986) sugerem a utilização de UMFs em todas as barras do sistema a fim de se obter uma medição direta dos estados do sistema e um estimador de estados linear. De fato, a utilização de um estimador linear na presença do SMFS é viável. Porém, em função do reduzido número de UMFs atualmente instaladas nos sistemas elétricos de potência, apenas no longo prazo poderá ser uma realidade (Abur, 2009).

A disponibilização também de medidas fasoriais de corrente nos ramos pelas UMFs desencadeou uma série de pesquisas relacionadas à alocação de UMFs no sistema de modo a torná-lo observável utilizando o menor número de UMFs. Como exemplos, citam-se Mohammadi-Ivatloo e Hosseini (2008), Emami, Abur e Galvan (2008), Nuqui e Phadke (2002), Xu e Abur (2004), Baldwin *et al.* (1993). Outro tema de grande importância que tem sido pesquisado é a forma de inclusão das medidas fasoriais no processo de estimação de estados (Zhao, 2006; Zhou *et al.*, 2006; Leites, 2010; Albuquerque, Simões Costa e Bez, 2010; Simões Costa e Albuquerque, 2011).

### 1.3 CONTRIBUIÇÕES DESTE TRABALHO

O presente trabalho tem como principal contribuição a extensão dos métodos qualitativos de análise de observabilidade topológica e de determinação de medidas críticas e conjuntos críticos propostos, respectivamente, por Quintana, Simões Costa e Mandel (1982) e Simões Costa, Piazza e Mandel (1990) de modo a considerar a presença das medidas fasoriais sincronizadas de tensão e de corrente no plano de medição.

A análise de observabilidade e criticidade de medidas através de técnicas que exploram a natureza qualitativa dos problemas evita manipulações de quantidades em ponto flutuante, obtendo-se reduzido tempo de execução dos aplicativos computacionais. O algoritmo combinatório utilizado em (Quintana, Simões Costa e Mandel, 1982) e (Simões Costa, Piazza e Mandel, 1990) faz uso da teoria de interseção de matróides e une eficiência computacional a resultados precisos.

Para a implementação computacional da inclusão de medidas oriundas das UMFs na formulação dos algoritmos de observabilidade topológica e de identificação de medidas e conjuntos críticos, este trabalho empreende um estudo específico sobre o problema de interseção de matróides aplicado a sistemas elétricos de potência e desenvolve uma metodologia de tratamento das medidas fasoriais sincronizadas de tensão e de corrente.

### 1.4 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

No Capítulo 2 apresenta-se uma revisão da formulação matemática do problema de EESP e dos principais conceitos da estimação de estados. São abordados o processamento de erros grosseiros, a análise da observabilidade e criticidade de medidas e a estimação de estados em planos de medição deficientes.

O Capítulo 3 tem por objetivo prover os fundamentos da teoria de matróides necessários para a descrição da solução dos problemas de análise de observabilidade topológica e de criticidade de medidas através da aplicação da teoria de matróides, conforme proposto nos trabalhos de Quintana, Simões Costa e Mandel (1982) e Simões Costa, Piazza e Mandel (1990).

No Capítulo 4 apresenta-se uma introdução à tecnologia de sistema de medição fasorial sincronizada e discutem-se os impactos

desta tecnologia na estimação de estados. Destaca-se que a formulação clássica da EESP e os subproblemas associados, como a determinação da observabilidade do sistema de potência e a identificação de medidas e conjuntos críticos, precisam ser adaptados para incorporar as medidas fasoriais de tensão e de corrente.

No Capítulo 5 é apresentada e discutida detalhadamente a modelagem proposta para a extensão dos métodos descritos no Capítulo 3, de modo a permitir a análise de observabilidade e criticidade de medidas considerando a presença das medidas fasoriais sincronizadas de tensão e de corrente no plano de medição.

O Capítulo 6 trata da implementação computacional do aplicativo desenvolvido PLAMED-F. Apresenta-se também a interface gráfica criada para facilitar a edição e a manipulação de arquivos de dados de entrada do aplicativo e sua execução.

O Capítulo 7 traz os resultados de simulação obtidos com a extensão do algoritmo de observabilidade topológica e de criticidade de medidas proposta neste trabalho. Os sistemas-teste utilizados para verificar o desempenho das metodologias são os sistemas IEEE de 14, 30, 57 e 118 barras.

O Capítulo 8 contém as conclusões deste trabalho de dissertação e sugestões para desenvolvimentos futuros.



## CAPÍTULO 2

### ESTIMAÇÃO DE ESTADOS EM SISTEMAS DE POTÊNCIA

#### 2.1 INTRODUÇÃO

A EESP é responsável por estimar valores confiáveis para as tensões nodais complexas, designadas variáveis de estado do sistema, a partir das quais o desempenho em regime permanente do sistema elétrico de potência é completamente descrito. Para tanto, o estimador de estado processa um conjunto redundante de telemedidas, contaminadas por ruídos diversos. O nível de redundância do plano de medição deve permitir a estimação completa das variáveis de estado, assim como a detecção e identificação de medidas portadoras de erros grosseiros.

Neste capítulo apresenta-se a formulação matemática do problema de EESP, o método de solução por Gauss-Newton e os problemas correlatos à estimação de estados, como o processamento de erros grosseiros, análise da observabilidade e criticidade de medidas e a estimação de estados em planos de medição deficientes. São abordadas também a análise de observabilidade topológica e as noções de observabilidade  $P$ - $\delta$  e observabilidade  $Q$ - $V$ .

#### 2.2 FORMULAÇÃO MATEMÁTICA DO PROBLEMA DE EESP

##### 2.2.1 Modelo de Medição Não-Linear

Seja um sistema de potência com  $N$  barras, onde são realizadas  $m$  medidas. Assumindo que a topologia e os parâmetros do sistema elétrico são conhecidos, é possível relacionar as quantidades medidas, expressas

como funções não-lineares das variáveis de estado, com os erros de medição através do seguinte modelo (Schweppe, Wildes e Rom, 1970):

$$z = h(x) + \eta \quad (2.1)$$

$$E(\eta) = 0; E(\eta\eta') = R \quad (2.2)$$

onde:

- $z$  : vetor de medidas ( $m \times 1$ );
- $x$  : vetor de variáveis de estado ( $n \times 1$ ), formado por  $N-1$  ângulos de tensão de barra e  $N$  magnitudes de tensão de barra;
- $h(.)$  : vetor de funções não-lineares relacionando as quantidades medidas e as variáveis de estado ( $m \times 1$ );
- $\eta$  : vetor de erros aleatórios de medição ( $m \times 1$ );
- $E(.)$  : operador expectância;
- $R$  : matriz de covariância dos erros de medição ( $m \times m$ ), suposta diagonal,  $R = \text{diag}(\sigma_1^2, \sigma_2^2, \dots, \sigma_m^2)$ .

Tradicionalmente, os tipos de medidas monitoradas para a estimação de estados são magnitude de tensão nas barras, injeção de potência ativa e reativa nas barras e fluxo de potência ativa e reativa nas linhas. Adicionalmente, quantidades não medidas diretamente, mas que contêm informações sobre as variáveis de estado do sistema, chamadas de pseudomedidas, podem ser utilizadas pelo estimador.

Clements, Krumpholz e Davis (1983) utilizam o termo *medida virtual* para se referir às medidas fornecidas pelas barras de injeção nula. Observa-se que apesar da não existência de medição física, os valores aprovionados pelas medidas virtuais são a rigor corretos. Portanto, estas informações podem ser tratadas como pseudomedidas de injeção de potência de baixa variância ou como restrições de igualdade a serem incluídas na formulação do problema de estimação de estados.

O plano de medição empregado, número, tipo e localização dos medidores instalados no sistema elétrico de potência, é determinante na solução da EESP. Uma condição necessária para se obter uma única solução para o problema de estimação de estados é que o número de medidas  $m$  seja maior ou igual ao número de variáveis de estado do sistema  $n=2N-1$  ou de forma equivalente que o nível de redundância  $\rho$  seja maior ou igual a 1,0. Esta condição também é requerida para a detecção e identificação de erros grosseiros. O nível de redundância global das medidas é definido como:

$$\rho \triangleq \frac{m}{n} = \frac{m}{2N-1} \quad (2.3)$$

### 2.2.2 Formulação da EESP por Mínimos Quadrados Ponderados

Na formulação do problema de estimação de estados pelo método dos Mínimos Quadrados Ponderados (MQP) uma estimativa para os estados do sistema é calculada de forma a minimizar a função custo dada pela equação 2.4 com relação ao vetor de estados  $x$  (Schweppe, Wildes e Rom, 1970):

$$J(x) = [z - h(x)]' R^{-1} [z - h(x)] \quad (2.4)$$

O somatório dos quadrados dos resíduos ponderados pelos inversos das variâncias dos erros de medição é representado por  $J(x)$ . Portanto, a matriz de ponderação  $R^{-1}$  atribui um peso maior às medidas com menor variância.

### 2.2.3 Solução do Problema de EESP pelo Método de Gauss-Newton

A minimização da função custo apresentada na equação 2.4 com relação ao vetor de estados  $x$  não tem solução fechada, pois  $f(x)$  é uma função não-linear de  $x$  (Schweppe, Wildes e Rom, 1970). No entanto, a minimização de  $J(x)$  consiste em um problema de otimização irrestrita de natureza quadrática que pode ser resolvido por um algoritmo de segunda ordem como o método de Newton.

A condição de otimalidade de primeira ordem para o problema representado pela equação 2.4, considerando o vetor de estados estimado  $\hat{x}$ , é expressa por:

$$\left. \frac{\partial J(x)}{\partial x} \right|_{x=\hat{x}} = -2H'(\hat{x})R^{-1}[z - h(\hat{x})] = 0 \quad (2.5)$$

onde

$$H(\hat{x}) = \left. \frac{\partial h(x)}{\partial x} \right|_{x=\hat{x}} = \text{Matriz Jacobiana} \quad (2.6)$$

A estrutura e as derivadas parciais da matriz Jacobiana  $H(x)$  podem ser encontradas de forma detalhada nas referências Simões Costa (1981) e Leites (2010).

Através da expansão da equação 2.4 em serie de Taylor em torno do ponto  $x^k$  e ao longo da direção  $\Delta x = x^{k+1} - x^k$ , até o termo de segunda ordem, obtém-se a seguinte função custo a ser minimizada:

$$J(x^k + \Delta x) = J(x^k) + \left. \frac{\partial J(x)}{\partial x} \right|_{x=x^k} \Delta x + \frac{1}{2} \Delta x' \left( \left. \frac{\partial^2 J(x)}{\partial x^2} \right|_{x=x^k} \right) \Delta x \quad (2.7)$$

O mínimo da função  $J(x^k + \Delta x)$  com relação à  $\Delta x$  é dado por:

$$\frac{\partial J(x^k + \Delta x)}{\partial (\Delta x)} = \left. \frac{\partial J(x)}{\partial x} \right|_{x=x^k} + \left. \frac{\partial^2 J(x)}{\partial x^2} \right|_{x=x^k} \Delta x = 0 \quad (2.8)$$

com

$$\Delta z = z - h(x^k)$$

$$\left. \frac{\partial J(x)}{\partial x} \right|_{x=x^k} = -2 \left( \frac{\partial h(x)}{\partial x} \right)^t R^{-1} [z - h(x)] \Big|_{x=x^k} = -2H'(x^k)R^{-1}\Delta z \quad (2.9)$$

$$\left. \frac{\partial^2 J(x)}{\partial x^2} \right|_{x=x^k} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ -2 \left( \frac{\partial h(x)}{\partial x} \right)^t R^{-1} [z - h(x)] \right] \Big|_{x=x^k} \quad (2.10)$$

$$\left. \frac{\partial^2 J(x)}{\partial x^2} \right|_{x=x^k} = 2H'(x^k)R^{-1}H(x^k) - 2 \sum_{j=1}^m \Delta z \frac{\partial^2 h_j(x)}{\partial x^2} \Big|_{x=x^k} \quad (2.11)$$

No método de Gauss-Newton o termo de segunda ordem associado à matriz Hessiana  $\frac{\partial^2 J(x)}{\partial x^2}$  é desprezado (Monticelli, 1999), de modo que a equação 2.5 pode ser reescrita como:

$$[H'(x^k)R^{-1}H(x^k)]\Delta x = H'(x^k)R^{-1}\Delta z \quad (2.12)$$

A equação 2.12 é denominada Equação Normal de Gauss e deve ser resolvida a cada iteração para a determinação do incremento do vetor de estados  $\Delta x$ , utilizado para atualizar o estado corrente. A solução é obtida quando  $\Delta x$  for menor que uma tolerância previamente definida.

## 2.3 PROCESSAMENTO DE ERROS GROSSEIROS

Qualquer estimador de estados adequado para monitoração on-line de sistemas de potência deve ser capaz de identificar medidas portadoras de erro grosseiro e eliminar o efeito destas medidas sobre as demais (Mili, Van Cutsem e Ribbens Pavella, 1984).



Em (Schweppe, Wildes e Rom, 1970) foram propostos métodos para detecção e identificação de erros grosseiros baseados na soma ponderada dos quadrados dos resíduos  $J(\hat{x})$  e no máximo resíduo normalizado, respectivamente.

O vetor dos resíduos de medição é dado por:

$$r = z - \hat{z} \quad (2.13)$$

onde  $z$  é o vetor de quantidades medidas e  $\hat{z}$  é o vetor dos valores estimados para as quantidades medidas.

Nota-se que o vetor dos erros de medição  $\eta$  é suposto possuir distribuição normal, com média zero e matriz de covariância diagonal. Esta suposição possibilita desenvolver um procedimento para a detecção de medidas espúrias baseado no valor dos resíduos de medição. Como tanto os resíduos quanto a soma ponderada do quadrado dos resíduos são variáveis aleatórias, é razoável utilizar testes de detecção baseados nas propriedades estatísticas destas variáveis, como o teste estatístico de hipóteses (Simões Costa, 1981).

Considerando a hipótese de que não existem erros grosseiros, o valor de  $J(\hat{x})$  tem a distribuição do Qui-quadrado ( $\chi^2$ ) com  $(m-n)$  graus de liberdade (Handschin et al., 1975). Para uma probabilidade de falso alarme  $\alpha$  pode-se determinar o limiar  $K = \chi^2_{m-n; 1-\alpha}$  tal que:

$$P(J(\hat{x}) > K | J(\hat{x}) \text{ apresenta a distribuição } \chi^2) = \alpha \quad (2.14)$$

onde  $P(a > b | c)$  representa a probabilidade de que  $a$  seja maior do que  $b$  supondo que  $c$  é verdadeiro.

Deste modo, se a comparação do valor de  $J(\hat{x})$  com o valor de  $K$  indicar que  $J(\hat{x}) > K$ , rejeita-se a hipótese de que não existem erros grosseiros nas medidas que compõem o plano de medição. Neste caso devem ser identificadas as medidas portadoras de erros grosseiros.

No modelo de medição linearizado, o vetor de resíduos de estimação  $r = \Delta z - \Delta \hat{z}$  pode ser reescrito como (por conveniência o argumento de  $H$  é suprimido):

$$r = WR^{-1}\Delta z \quad (2.15a)$$

onde

$$W = R - H(H'R^{-1}H)^{-1}H' \quad (2.15b)$$

A partir da equação 2.15a, define-se a matriz de sensibilidade dos resíduos  $S$  como:

$$S \triangleq WR^{-1} = I - H(H'R^{-1}H)^{-1}H'R^{-1} \quad (2.16)$$

Utilizando as propriedades da matriz de sensibilidade dos resíduos  $S$ , o vetor de resíduos pode ser finalmente expresso por (Handschin *et al.*, 1975; Simões Costa, 1981):

$$r = S\eta \quad (2.17)$$

donde se conclui que a  $i$ -ésima coluna de  $S$  indica como os erros de medição associados à  $i$ -ésima medida se espalham sobre os elementos do vetor de resíduos.

Em (Handschin *et al.*, 1975) é demonstrado que  $W$  é a matriz de covariância dos resíduos. Portanto, o vetor de resíduos normalizados é definido como:

$$r_N \triangleq \text{diag}\{W\}^{-1/2} r \quad (2.18)$$

Se apenas uma medida é portadora de erro grosseiro, sendo que esta medida não é uma medida crítica ou faz parte de um conjunto crítico, e as demais medidas são perfeitas, então a medida errônea apresenta o máximo resíduo normalizado em valor absoluto (Mili, Van Cutsem e Ribbens Pavella, 1984). No caso da ocorrência de erros grosseiros múltiplos, pode ser necessário recorrer a outros métodos de processamento, pois as medidas errôneas podem não ser aquelas relativas aos maiores resíduos normalizados (Mili, Van Cutsem e Ribbens Pavella, 1984).

## 2.4 OBSERVABILIDADE DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

### 2.4.1 Definição de Observabilidade

O problema da observabilidade de sistemas de potência consiste essencialmente em se determinar se as medidas que compõem um determinado plano de medição fornecem informação suficiente para permitir a estimação de estados do sistema.

Em tempo real, os resultados da análise de observabilidade poderão determinar mudanças nos procedimentos de estimação de estados caso o sistema se configure como não-observável: proceder à

estimação de estados das ilhas observáveis ou alocar pseudomedidas de forma a recuperar a observabilidade do sistema. Na etapa de projeto do sistema de medição, a análise de observabilidade é utilizada para avaliar o bom desempenho do estimador de estados em caso de eventual perda de medidas devido a falhas do sistema de telemedição ou eliminação de medidas no processamento de erros grosseiros.

Para resolver a Equação Normal de Gauss apresentada pela equação 2.12 e obter uma única estimativa dos estados do sistema, a matriz  $G = H' R^{-1} H$ , denominada matriz de informação ou matriz ganho, deve ser não-singular. Dado que  $R$  é uma matriz diagonal não-singular, tem-se que a matriz Jacobiana  $H$  deve ter posto completo (Stewart, 1973). Neste caso, o sistema de potência é definido como *algebricamente observável* com respeito a um conjunto de medidas (Krumpholz, Clements e Davis, 1980).

O sistema de potência é definido como *numericamente observável* se as estimativas para os estados podem ser obtidas através de solução iterativa partindo de valores iniciais iguais a 1,0 pu para os módulos e 0 radianos para os ângulos das tensões nas barras (Krumpholz, Clements e Davis, 1980). É possível, para um sistema algebricamente observável, que no curso da solução iterativa surjam problemas numéricos, motivados por mau condicionamento da matriz Jacobiana ou pelo fato do estado real estar muito afastado dos valores iniciais que lhes foram atribuídos, os quais impeçam a convergência. Portanto, a observabilidade numérica implica na observabilidade algébrica, mas o contrário pode não ser verdadeiro (Krumpholz, Clements e Davis, 1980).

Dentre os métodos de análise de observabilidade destacam-se os métodos topológicos e os métodos numéricos. Uma abordagem numérica do problema de observabilidade foi proposta por Monticelli e Wu (1985a). De modo geral, os métodos numéricos de análise de observabilidade apresentam integração direta com o estimador de estado. Como referências adicionais sobre métodos numéricos de observabilidade, citam-se Gou e Abur (2000); Korres *et al.* (2003); Castillo *et al.* (2006).

O conceito de observabilidade topológica foi introduzido por Clements e Wollenberg (1975). Os métodos topológicos fundamentam-se na teoria de grafos e utilizam a topologia da rede, o plano de medição e as leis de Kirchhoff para concluir sobre a observabilidade do sistema. O método de análise de observabilidade topológica requer a solução de

um problema combinatório complexo, porém evita cálculos em ponto flutuante, o que lhe confere rapidez computacional.

#### 2.4.2 Observabilidade $P-\delta$ e $Q-V$

A aplicação do desacoplamento  $P-\delta$  e  $Q-V$  à análise de observabilidade permite decompor de modo correspondente o problema de análise de observabilidade. O método de fluxo de potência desacoplado rápido proposto em (Stott e Alsac, 1974) e o método de estimador de estados desacoplado rápido (Garcia, Monticelli e Abreu, 1979) valem-se do desacoplamento  $P-\delta$  e  $Q-V$  para obter vantagens computacionais na solução dos respectivos problemas.

O desacoplamento  $P-\delta$  e  $Q-V$  baseia-se no princípio de que as medidas de potência ativa são portadoras de maior informação sobre os ângulos de tensão nas barras relacionadas às quantidades medidas, ao passo que as medidas de potência reativa são portadoras de maior informação sobre as magnitudes de tensão nas barras. O desacoplamento das “medidas ativas” (medidas de fluxo de potência ativa e de injeção de potência ativa) e “medidas reativas” (medidas de fluxo de potência reativa, de injeção de potência reativa e de magnitude de tensão nodal) é verificado sobretudo em redes cujos ramos apresentam relações reatância/resistência altas.

Na análise de observabilidade, o desacoplamento  $P-\delta$  e  $Q-V$  é também útil para o tratamento da assimetria do plano de medidas, devido à presença de medidas de magnitude de tensão, porém não de ângulo de tensão.

O modelo de medição desacoplado pode ser reescrito como (Schweppe, Wildes e Rom, 1970; Krumpholz, Clements e Davis, 1980; Monticelli e Wu, 1985a):

$$z_p = h_p(x) + \eta_p \quad (2.19)$$

$$z_q = h_q(x) + \eta_q \quad (2.20)$$

onde  $z_p$  é o vetor ( $m_p \times 1$ ) formado pelas medidas de injeção e de fluxo de potência ativa e  $z_q$  é o vetor ( $m_q \times 1$ ) composto pelas medidas de injeção e de fluxo de potência reativa e de magnitude de tensão.

O vetor de estados é dado por:

$$x = (\delta, V) \quad (2.21)$$

onde  $V$  é o vetor  $(N \times 1)$  cujos elementos são as magnitudes de tensão nas barras e  $\delta$  é o vetor  $(N - 1 \times 1)$  constituído pelos ângulos de tensão nas barras excluindo-se a barra de referência.

A matriz Jacobiana das funções não lineares  $h_p(x)$  e  $h_q(x)$  é expressa como:

$$H(\delta, V) = \begin{bmatrix} H_{p\delta} & H_{pV} \\ H_{q\delta} & H_{qV} \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

onde  $H_{p\delta} = \partial h_p(x) / \partial \delta$ ,  $H_{pV} = \partial h_p(x) / \partial V$ ,  $H_{q\delta} = \partial h_q(x) / \partial \delta$  e  $H_{qV} = \partial h_q(x) / \partial V$ .

Considerando o desacoplamento no modelo (Krumpholz, Clements e Davis, 1980) as submatrizes  $H_{pV}$  e  $H_{q\delta}$  são desprezadas e o problema na forma linearizada é decomposto em dois subproblemas:

$$\Delta z_p = H_{p\delta} \Delta \delta + \eta_p \quad (2.23)$$

$$\Delta z_q = H_{qV} \Delta V + \eta_q \quad (2.24)$$

Por conseguinte, um sistema de potência é  $P$ - $\delta$  observável com respeito a um conjunto de medidas se o posto da matriz  $H_{p\delta}$  for igual a  $N - 1$ . De forma similar, um sistema de potência é  $Q$ - $V$  observável com respeito a um conjunto de medidas se o posto da matriz  $H_{qV}$  for igual a  $N$  (Krumpholz, Clements e Davis, 1980).

Para planos de medição onde existe paridade entre as medidas ativas e reativas, pode-se extrair conclusões sobre as observabilidades  $P$ - $\delta$  e  $Q$ - $V$  a partir de uma única aplicação do algoritmo de observabilidade. Em caso contrário, deve-se proceder à análise de observabilidade  $P$ - $\delta$  e da observabilidade  $Q$ - $V$ .

### 2.4.3 Observabilidade Topológica

A análise de observabilidade topológica explora o desacoplamento  $P$ - $\delta$  e  $Q$ - $V$ . Para planos de medição com paridade entre as medidas ativas e reativas, o algoritmo de observabilidade precisa ser executado uma única vez. Com relação à assimetria dos problemas  $P$ - $\delta$  e  $Q$ - $V$  devido à presença no plano de medição de medidas de magnitude de tensão, porém não dos ângulos de fase correspondentes, Clements, Krumpholz e Davis (1982) e Van Cutsem e Gailly (1983) demonstraram que as medidas de tensão podem ser representadas, para análise de

observabilidade topológica, por medidas de fluxo reativo em uma linha fictícia, de susceptância unitária, conectando a barra onde a tensão é medida a uma barra fictícia adicional (nó terra).

As submatrizes  $H_{P\delta}$  e  $H_{QV}$ , introduzidas na equação 2.22, dependem do plano de medição, da topologia da rede elétrica e das admitâncias série das linhas. Além disso,  $H_{QV}$  depende ainda das admitâncias em derivação das linhas. De acordo com Quintana, Simões Costa e Mandel (1982), a estrutura de  $H_{P\delta}$  e  $H_{QV}$  permite as seguintes constatações:

- i) Uma medida de fluxo de potência em uma linha de transmissão produzirá uma equação no modelo de medição que relacionará as tensões complexas correspondentes às barras terminais da linha monitorada;
- ii) O efeito de uma medida de injeção é inter-relacionar a tensão complexa da barra monitorada com as tensões complexas de todas as barras a ela conectadas;
- iii) Uma medida de magnitude de tensão traz informação apenas da barra onde a medição é realizada.

Define-se o *grafo da rede elétrica* como um grafo cujos vértices correspondem às barras do sistema e cujas arestas correspondem aos ramos. A partir das considerações acima, pode-se formular uma regra de associação de medidas às arestas do grafo da rede. A regra preconiza que uma medida  $z$  pode ser atribuída a uma aresta  $a$  do grafo se  $z$  for uma medida de fluxo do ramo correspondente à aresta  $a$  ou se  $z$  for uma medida de injeção em qualquer das barras terminais da aresta  $a$  (Quintana, Simões Costa e Mandel, 1982).

Como exemplo, apresenta-se na Figura 2.1 um sistema de 4 barras e seu respectivo plano de medição  $P\text{-}\delta$ , composto por três medidas de fluxo de potência e uma medida de injeção de potência. A associação das medidas às arestas do grafo é ilustrada pela Figura 2.2, onde se observa que a medida de injeção na barra 1 pode ser atribuída a três possíveis arestas.

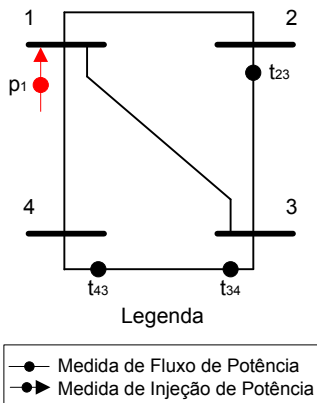


Figura 2.1 – Sistema de 4 Barras: Plano de Medição  $P$ - $\delta$

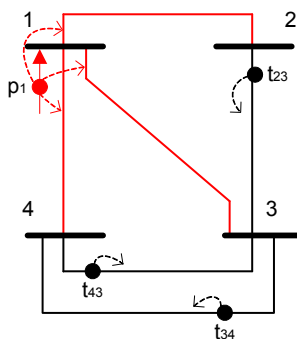


Figura 2.2 – Sistema de 4 Barras: Possíveis Associações de Medidas a Arestas

Uma *árvore geradora* do grafo da rede é dita *observável*, com respeito a um conjunto de medidas, se for possível associar uma medida deste conjunto a cada aresta da árvore, sem que existam duas arestas associadas à mesma medida. A análise de observabilidade de um sistema de potência é equivalente à busca de uma *Árvore Geradora Observável* (AGO) do grafo da rede (Krumpholz, Clements e Davis, 1980).

A Figura 2.3 mostra uma possível AGO associada ao plano de medição do sistema de 4 barras da Figura 2.1.

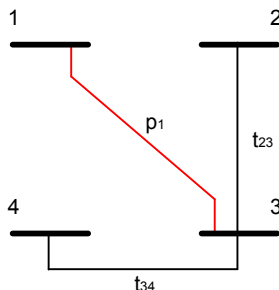


Figura 2.3 – Sistema de 4 Barras: Possível AGO

A equivalência da observabilidade algébrica e topológica foi demonstrada por Krumpholz, Clements e Davis (1980) para todas as situações práticas de interesse.

O algoritmo combinatório para a determinação da observabilidade topológica utilizado neste trabalho, o qual será detalhado no capítulo 3, faz uso da teoria de interseção de matróides e foi proposto por Quintana, Simões Costa e Mandel (1982). No capítulo 3 são também apresentados alguns conceitos da teoria de grafos importantes para o desenvolvimento e compreensão da análise de observabilidade topológica.

## 2.5 ANÁLISE DE CRITICIDADE DE MEDIDAS

### 2.5.1 Medidas Críticas

Uma medida é considerada crítica se sua supressão do conjunto de medidas provoca redução do posto da matriz Jacobiana  $H$ , tornando o sistema não-observável (Clements, Krumpholz e Davis, 1981).

A correta determinação de medidas críticas é de extrema importância tanto para avaliar a confiabilidade do plano de medição, indicando pontos onde o sistema de medição deve ser reforçado, quanto para o processamento de erros grosseiros.

Clements, Krumpholz e Davis (1981) provaram que somente medidas não-críticas apresentam resíduos de estimação detectáveis. Partindo do fato de que um erro na  $i$ -ésima medida é detectável se, e somente se, a  $i$ -ésima coluna da matriz de sensibilidade dos resíduos  $S$  é não-nula (Handschin *et al*, 1975), os autores demonstraram que:



- i) A  $i$ -ésima coluna da matriz de sensibilidade dos resíduos  $S$  é nula se, e somente se, a  $i$ -ésima linha da matriz Jacobiana  $H$  é linearmente independente das outras linhas de  $H$ ;
- ii) Se a  $i$ -ésima linha da matriz Jacobiana  $H$  é linearmente independente das outras linhas de  $H$ , então a medida associada à  $i$ -ésima linha de  $H$  é uma medida crítica.

Portanto, o erro em uma medida é detectável se, e somente se, a medida é não-crítica (Clements, Krumpholz e Davis, 1981).

A propriedade associada à coluna da matriz de sensibilidade dos resíduos  $S$  correspondente a uma medida crítica mostra que medidas críticas não interagem com as demais, e desta forma um eventual erro sobre uma medida crítica não afeta os resíduos de outras medidas.

Além disso, medidas críticas apresentam resíduos iguais a zero (Van Cutsem, 1985), propriedade esta que torna impossível o cálculo do resíduo normalizado e conseqüentemente a detecção e identificação de erros grosseiros em medidas críticas.

### 2.5.2 Conjuntos Críticos

Um conjunto crítico é definido como um subconjunto de medidas tal que a perda de qualquer uma delas torna simultaneamente críticas todas as demais medidas do referido subconjunto (Mili, Van Cutsem e Ribbens Pavella, 1984). Nesta referência é provado que os resíduos normalizados associados às medidas pertencentes a conjuntos críticos são iguais, o que resulta na não-identificabilidade da medida portadora de erro grosseiro que pertença a um conjunto crítico. Nota-se, entretanto que erros grosseiros em medidas pertencentes a conjuntos críticos são detectáveis, pois os resíduos normalizados das medidas são diferentes de zero.

As definições de medidas e conjuntos críticos apresentadas são casos particulares da noção mais geral de conjunto  $k$ -crítico. Diz-se que um subconjunto  $S_{cr}$  de medidas é  $k$ -crítico, sendo  $k$  um número inteiro, se (Piazza, 1989):

- i) Qualquer conjunto de  $k$  medidas pertencentes a  $S_{cr}$ , se removido do plano de medição, deixa o sistema ainda observável;
- ii) Qualquer conjunto de  $k+1$  medidas pertencentes a  $S_{cr}$ , se removido do plano de medição, torna o sistema não-observável.

No presente trabalho há interesse nos casos particulares de  $k=0$ , ou seja,  $S_{cr}$  formado por uma medida crítica, e  $k=1$ , referenciado aqui como conjunto crítico.

Dentre os procedimentos propostos para a determinação de medidas críticas e conjuntos críticos, são encontrados na literatura métodos numéricos (Ayres e Haley, 1986; Korres e Contaxis, 1991) e métodos baseados na extensão de algoritmos de observabilidade (Clements, Krumpholz e Davis, 1982; Simões Costa, Piazza e Mandel, 1990).

O método proposto por Simões Costa, Piazza e Mandel (1990) para a determinação de medidas e conjuntos críticos será empregado no desenvolvimento deste trabalho.

## 2.6 ESTIMAÇÃO DE ESTADOS EM SISTEMAS COM PLANOS DE MEDIÇÃO DEFICIENTES

O projeto do plano de medição deve assegurar uma estimação de estados confiável mesmo em situação de contingência, como falhas no sistema de telemedição e perdas de linhas. Em (Coser, Simões Costa e Rolim, 2006) é proposta uma metodologia de otimização para projetos de planos de medição observáveis e robustos, isentos de medidas críticas e conjuntos críticos. Para tanto, utilizam-se técnicas de algoritmos genéticos e um método topológico de análise de observabilidade e criticidade de medidas.

Não obstante, em tempo real podem ocorrer situações que levem à não-observabilidade do sistema. Neste caso, as alternativas possíveis para se obter as estimativas das variáveis de estado do sistema são: proceder à estimação de estados das ilhas observáveis ou alocar pseudomedidas de forma a recuperar a observabilidade do sistema.

O conceito de ilha observável foi introduzido por Clements e Wollenberg (1975). De acordo com a definição dos autores, uma *ilha observável* é um conjunto de barras do sistema entre as quais os fluxos das linhas podem ser determinados a partir das medidas disponíveis. A estimação de estados apenas das ilhas observáveis do sistema não é comumente satisfatória, porque não oferece nenhuma informação sobre as variáveis de estado das regiões não-observáveis.

Com relação à alocação de pseudomedidas para a recuperação da observabilidade do sistema, deve-se assegurar que qualquer pseudomedida utilizada seja crítica. Pseudomedidas são baseadas em informações históricas ou dados de previsão de carga, sendo menos confiáveis que as demais medidas. Portanto, o emprego de pseudomedidas críticas garante que as partes observáveis do sistema não

serão afetadas por erros introduzidos pelas pseudomedidas (Clements, Krumpolz e Davis, 1983; Monticelli e Wu, 1985b; Piazza, 1989).

## 2.7 CONCLUSÕES

Este capítulo fornece fundamento teórico para a extensão dos métodos qualitativos de análise de observabilidade topológica e de determinação de medidas críticas e conjuntos críticos propostos neste trabalho.

Apresentam-se os aspectos gerais da formulação matemática do problema de EESP por mínimos quadrados ponderados, incluindo o método de solução por Gauss-Newton. As técnicas de detecção e identificação de erros grosseiros, de suma importância para o adequado desempenho do estimador de estados, são abordadas na sequência.

Explora-se também a análise da observabilidade do sistema, com maior ênfase na análise de observabilidade topológica. As questões relacionadas à análise da criticidade de medidas, que pode constituir-se em uma extensão dos métodos de observabilidade topológica, versam sobre a importância desta análise para a indicação de pontos de reforço no plano de medição e para o processamento de erros grosseiros. Discute-se, por fim, a estimação de estados em planos de medição deficientes, que se utiliza do resultado da análise de observabilidade para a identificação das ilhas observáveis do sistema e alocação de pseudomedidas críticas.



## **CAPÍTULO 3**

### **MÉTODO TOPOLÓGICO DE ANÁLISE DE OBSERVABILIDADE**

#### **3.1 INTRODUÇÃO**

Neste capítulo apresenta-se uma introdução à teoria de matróides e a um método de interseção de matróides, o qual apresenta características favoráveis à análise de observabilidade topológica. A teoria de matróides é uma abordagem unificadora para vários problemas combinatórios, como aqueles relacionados com grafos e álgebra linear.

Embora a abordagem dos problemas de análise de observabilidade e criticidade tenha sido previamente utilizada (Quintana, Simões Costa e Mandel, 1982; Simões Costa, 1988; Simões Costa, Piazza e Mandel, 1990), esta dissertação apresenta uma descrição bastante detalhada do embasamento matemático do método que não foi objeto de nenhum dos trabalhos anteriores. O aprofundamento teórico tornou possível realizar a reestruturação dos programas computacionais para análise de observabilidade e criticidade. Esta se constitui em uma etapa essencial para a generalização desse método, visando o processamento de medidas fasoriais sincronizadas, o que será objeto do capítulo 5 deste trabalho.

Com o objetivo de facilitar o estudo de matróides são apresentados, no início do capítulo, conceitos matemáticos, notações e definições relacionadas à teoria de conjuntos e de grafos.

Aborda-se em seguida a proposta de formulação do problema de observabilidade topológica em termos da busca de uma árvore geradora observável através do método de interseção de matróides (Quintana, Simões Costa e Mandel, 1982). Por fim, é apresentada a determinação de medidas críticas e conjuntos críticos utilizando o arcabouço desta

formulação do problema de observabilidade idealizada por Simões Costa, Piazza e Mandel (1990).

## 3.2 CONCEITOS MATEMÁTICOS

### 3.2.1 Notação

A notação  $U = S \setminus T$  significa que  $U$  é obtido suprimindo-se de  $S$  todos os elementos de  $T$  que também pertencem a  $S$ .

O símbolo  $\Delta$  denota a *diferença simétrica* entre dois conjuntos, sendo  $S \Delta T = S \cup T \setminus S \cap T$ .

A notação  $|S|$  denota o número de elementos do conjunto  $S$ , ou *cardinalidade* de  $S$ .

A notação  $S \subseteq T$  expressa que  $S$  é um subconjunto de  $T$ , ou seja,  $\forall x(x \in S \rightarrow x \in T)$ .

A notação  $S \subset T$  expressa que  $S$  é um subconjunto próprio de  $T$ , isto é,  $S \subseteq T$  mas  $S \neq T$ .

### 3.2.2 Definições Preliminares

Seja  $\mathfrak{S}$  uma família de conjuntos.  $S \in \mathfrak{S}$  é *maximal* em  $\mathfrak{S}$  com relação a uma dada propriedade  $P$  se  $S$  satisfaz  $P$  e não existe  $T \in \mathfrak{S}$  tal que  $S \subset T$  que também satisfaça  $P$ . De forma similar,  $S \in \mathfrak{S}$  é *minimal* em  $\mathfrak{S}$  com relação a  $P$  se  $S$  satisfaz a propriedade  $P$  e não existe  $T \in \mathfrak{S}$  tal que  $T \subset S$  que também satisfaça  $P$ . Nota-se que um conjunto maximal não é necessariamente único ou tem cardinalidade máxima. É possível também que um conjunto seja maximal e minimal em  $\mathfrak{S}$ .

Um *grafo*  $G=(V,E)$  é uma estrutura que consiste de um conjunto finito de  $V$  elementos chamados de vértices e de um conjunto de pares de vértices não-ordenados  $E$  chamados de arestas.

Um *dígrafo*, *grafo orientado* ou *grafo direcionado* é um grafo cujas arestas são direcionadas.

Um *caminho* é uma sequência alternada de vértices e arestas de  $G$  que se inicia e termina em vértices, tal que cada aresta é incidente no vértice que a precede e no vértice que a segue.

Um *ciclo* ou *circuito* é um caminho em que o vértice inicial coincide com o vértice final. Um grafo que não contém ciclos é dito ser *acíclico*.

Uma *árvore* em  $G$  é um subgrafo acíclico conexo. Um conjunto de árvores é uma *floresta*.

Uma *árvore geradora* de  $G$  se caracteriza por possuir o mesmo conjunto de vértices que  $G$ .

Um *grafo bipartido*  $G_b(V_1, V_2) = (V_1, V_2, E)$  é um grafo cujo conjunto de vértices pode ser particionado em dois subconjuntos  $V_1$  e  $V_2$ , de modo que cada aresta do conjunto  $E$  possui um de seus vértices terminais incidentes em  $V_1$  e o outro em  $V_2$  e não há arestas entre vértices de um mesmo subconjunto. A Figura 3.1, mostrada a seguir, ilustra o conceito de grafo bipartido.

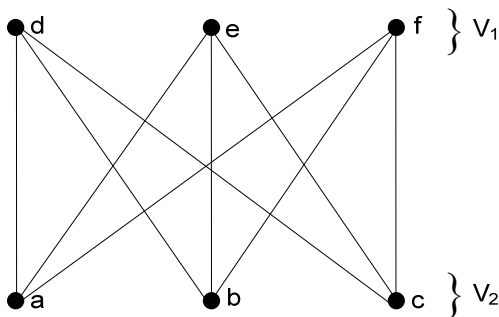


Figura 3.1 – Grafo Bipartido  $G_b(V_1, V_2)$

### 3.3 TEORIA DE MATRÓIDES

#### 3.3.1 Definição de Matróides

A teoria de matróides foi proposta por Hassler Whitney em 1935 como produto de suas investigações da teoria algébrica de dependência linear. Whitney observou que propriedades fundamentais da dependência são comuns a grafos e matrizes, e utilizou o conceito de matróides para formalizar estas semelhanças. Desde então este conceito tem encontrado ramificações em diversas áreas, como a teoria de grafos, a teoria de redes elétricas e Programação Linear. Em particular, Jack Edmonds foi responsável por ressaltar a importância da teoria de matróides para a otimização combinatória, fornecendo muitos resultados pioneiros (Lawler, 1976).

Matróides são estruturas combinatórias cuja definição de independência é axiomática.

Para que o par ordenado  $M = (S, \mathfrak{I})$  seja um matróide, onde  $S$  é um conjunto finito e não vazio, as seguintes propriedades devem ser satisfeitas:

- i)  $\mathfrak{I}$  é uma família não vazia de subconjuntos de  $S$ , chamados de conjuntos independentes de  $S$ , tal que se  $Y \in \mathfrak{I}$  e  $X \subseteq Y$  então  $X \in \mathfrak{I}$ ;
- ii) O conjunto vazio  $\emptyset$  é um conjunto independente;
- iii) Se  $X \in \mathfrak{I}$ ,  $Y \in \mathfrak{I}$ , e  $|X| < |Y|$ , então existe algum elemento  $e \in Y \setminus X$  tal que  $X \cup \{e\} \in \mathfrak{I}$ .

Se a propriedade (ii) é satisfeita, diz-se que  $\mathfrak{I}$  é hereditária. Da mesma forma, se a propriedade (iii) é satisfeita então  $M$  satisfaz a propriedade de troca.

Como exemplo, considere que os elementos de  $S$  são os vetores coluna de uma dada matriz. É fácil verificar que os subconjuntos de vetores linearmente independentes formam uma família de conjuntos independentes e, portanto esta estrutura define o *matróide matricial*.

Outro exemplo a ser citado é o de *matróide do grafo*  $M_G = (S, \mathfrak{I})$ , onde o grafo é representado por  $G = (V, E)$ . Considere que o conjunto  $S$  é definido por  $E$ , o conjunto de arestas de  $G$ . Se  $X$  é um subconjunto de  $E$ , então define-se que  $X \in \mathfrak{I}$  se, e somente se, este subconjunto de arestas forma uma floresta. Sob estas condições, constata-se que as propriedades de definição de matróides são satisfeitas.

Os conceitos de base, circuito e posto também podem ser aplicados à teoria de matróides (Lawler, 1976):

- Uma *base* de um matróide  $M$  é um conjunto independente maximal. Todas as bases de um matróide têm a mesma cardinalidade, sendo o *posto* do matróide igual à cardinalidade das bases.
- Se  $I$  é um conjunto independente de um matróide e  $I+e$  é dependente, então  $I+e$  contém um único circuito  $C$ , chamado de *circuito fundamental*. Além disso, se  $e'$  é um elemento qualquer em  $C$ , então  $I+e-e'$  é independente.

Estes conceitos podem ser aplicados a um dado grafo  $G$  a título de ilustração. Uma base para o matróide correspondente é o conjunto de arestas que formam uma árvore geradora de  $G$ . Se  $G$  tem  $N$  vértices, a



árvore geradora de  $G$  tem  $N-1$  arestas e, portanto o posto do matróide é igual a  $N-1$ .

Seja o grafo  $G$  mostrado na Figura 3.2 (Lawler, 1976). As arestas  $e1$ ,  $e2$  e  $e3$  formam um conjunto independente  $I$ , e a adição de qualquer uma das arestas  $e4$ ,  $e5$ ,  $e6$ ,  $e7$  ou  $e9$  a este conjunto independente  $I$  forma uma base de cardinalidade igual a 4. No entanto, a adição das arestas  $e4$  e  $e5$  ao conjunto independente  $I$  forma um conjunto dependente, contendo o circuito fundamental formado pelas arestas  $e1$ ,  $e3$ ,  $e4$  e  $e5$ .

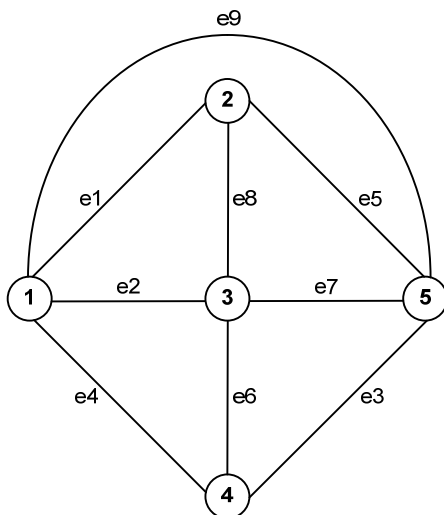


Figura 3.2 – Grafo Exemplo

### 3.3.2 Matróide de Partição

Seja  $S_1, S_2, \dots, S_k$  uma partição de  $S$ , isto é,  $S$  é a união dos subconjuntos  $S_i$  não vazios e disjuntos. Considere, além disso,  $k$  inteiros não-negativos  $a_1, a_2, \dots, a_k$ , de tal forma que  $a_i \leq |S_i|$ . Para  $\mathfrak{T}$  formado por aqueles subconjuntos  $X$  de  $S$  que satisfazem a propriedade  $|X \cap S_i| \leq a_i$  para todo  $i=1, \dots, k$ , prova-se que  $M_p = (S, \mathfrak{T})$  é um matróide (Recski, 1989), chamado *matróide de partição*.

Um exemplo de matróide de partição extraído de (Simões Costa, Piazza e Mandel, 1990) é apresentado a seguir.

Considere um conjunto  $S$  de objetos e um conjunto de cores  $i=\{0, 1, 2, \dots, k-1\}$  e uma “função de coloração” tal que cada elemento de  $S$  seja pintado com uma das  $k$  cores. Admite-se a possibilidade de que diversos elementos sejam pintados com a mesma cor, porém define-se como conjunto independente  $X \in \mathfrak{I}$  um conjunto de elementos em  $S$  que contém no máximo um elemento de cada *cor diferente de zero*. Portanto, vários elementos da *cor zero* são admissíveis.

Na Figura 3.3 ilustram-se os elementos do conjunto  $S$ , particionados de acordo com suas respectivas cores. O subconjunto de  $S$  indicado na Figura 3.3 pelas setas é um exemplo de conjunto independente  $X$ .

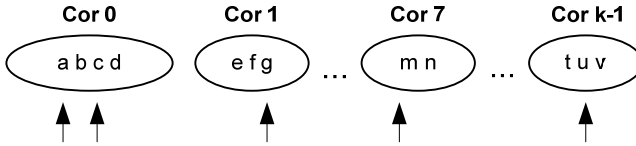


Figura 3.3 – Exemplo de Matróide de Partição e um de Seus Conjuntos Independentes

Aplicando o conceito de matrôide de partição ao conjunto  $S$  apresentado, observa-se que as partições  $S_i$  do conjunto  $S = \{a, b, c, d, e, f, g, \dots, m, n, \dots, t, u, v\}$  e os parâmetros  $a_i$  correspondentes são dados por:

$$\begin{array}{ll}
 S_0 = \{a, b, c, d\} & a_0 = |S_0| = 4 \\
 S_1 = \{e, f, g\} & a_1 = 1 \\
 \vdots & \vdots \\
 S_7 = \{m, n\} & a_7 = 1 \\
 \vdots & \vdots \\
 S_{k-1} = \{t, u, v\} & a_{k-1} = 1
 \end{array}$$

Nota-se que o conjunto independente  $X = \{a, c, g, m, u\}$  indicado na Figura 3.3 satisfaz a propriedade  $|X \cap S_i| \leq a_i$  para todo  $i=0, \dots, k-1$ . Portanto, o matrôide  $M_p = (S, \mathfrak{I})$ , cuja lei de formação de  $X \in \mathfrak{I}$  foi definida acima, é um matrôide de partição. Uma base para o matrôide exemplo da Figura 3.3 é constituída por todos os elementos da *cor zero*, adicionados de um elemento de cada uma das demais cores. Dois elementos da mesma cor diferente de zero formam um circuito.

### 3.3.3 Interseção de Matróides

Dentre os diversos autores que estudaram o problema de interseção de matróides, destacam-se os trabalhos de Edmonds (Edmonds e Fulkerson, 1965; Edmonds, 1965; Edmonds, 1970; Edmonds, 1979), Lawler (Lawler, 1970; Lawler, 1975) e Frank (Frank, 1981).

Sejam  $M_1 = (S, \mathfrak{I}_1)$  e  $M_2 = (S, \mathfrak{I}_2)$  dois matróides definidos sobre o mesmo conjunto de elementos  $S$ . A estrutura  $(S, \mathfrak{I}_1 \cap \mathfrak{I}_2)$  é chamada de interseção dos matróides  $M_1$  e  $M_2$ , sendo  $I \in \mathfrak{I}_1 \cap \mathfrak{I}_2$  independente em ambos os matróides.

Muitos problemas de otimização combinatória podem ser reformulados como o problema de encontrar o conjunto independente  $I \in \mathfrak{I}_1 \cap \mathfrak{I}_2$  com o maior número possível de elementos. Lawler classifica este problema como interseção de cardinalidade, e propõe um algoritmo de solução baseado em seqüências de aumento (Lawler, 1976).

Seja  $I$  um conjunto independente em  $M_1$  e  $M_2$ . Um conjunto  $E$  com  $k$  elementos distintos, sendo  $k$  ímpar, é uma *seqüência de aumento* em relação a  $I$  se, com a adição de elementos ímpares de  $E$  a  $I$  e a subtração de elementos pares de  $E$  a  $I$ , o conjunto  $I'$  resultante é independente em  $M_1$  e  $M_2$  e incrementa em uma unidade a cardinalidade de  $I$ .

Por outro lado, um conjunto  $E$  com  $k$  elementos distintos, sendo  $k$  par, é uma *seqüência de troca* com respeito a  $I$  se a adição de elementos ímpares de  $E$  a  $I$  e a subtração de elementos pares de  $E$  a  $I$  gera um conjunto  $I'$  que é simultaneamente independente em  $M_1$  e  $M_2$ . Como o número de elementos de  $E$  adicionados e subtraídos a  $I$  é igual, neste caso não há incremento na cardinalidade de  $I$ .

Uma seqüência de aumento com respeito a  $I$  pode ser construída de acordo com o que segue (Lawler, 1976). O primeiro elemento da seqüência  $e1$  é tal que  $I+e1$  é independente em  $M_1$ . Se  $I+e1$  é independente também em  $M_2$  a seqüência está completa. Caso contrário,  $I+e1$  contém um único circuito em  $M_2$ , e escolhe-se um elemento  $e2$  diferente de  $e1$  pertencente ao mesmo circuito. Claramente,  $I+e1-e2$  é independente em ambos  $M_1$  e  $M_2$ . O próximo passo é adicionar um elemento  $e3$  tal que  $I+e1-e2+e3$  é independente em  $M_1$ ,

enquanto  $I+e3$  não é independente. Se  $I+e1-e2+e3$  é independente também em  $M_2$  a seqüência está completa, senão repete-se o procedimento de retirada e adição de elementos até que a seqüência esteja completa.

Observa-se que a adição de elementos ímpares preserva a independência em  $M_1$ , mas pode ocasionar dependência em  $M_2$ . A retirada dos elementos pares restabelece a independência em  $M_2$ .

Para determinar a interseção de máxima cardinalidade recorre-se sucessivamente à busca de seqüências de aumento para  $I'$ , até que a máxima cardinalidade seja encontrada. A partir deste ponto, serão então encontradas no máximo seqüências de troca.

Nota-se que a interseção de dois matróides não é necessariamente um matróide (Recski, 1989).

### 3.3.4 Método de Interseção de Matróides (Frank, 1981; Piazza, 1989)

Considere um conjunto  $I$ , o qual é independente em  $M_1 = (S, \mathfrak{I}_1)$  e  $M_2 = (S, \mathfrak{I}_2)$ , e um grafo bipartido auxiliar  $H(V_1, V_2)$ , cujos conjuntos de vértices  $V_1$  e  $V_2$  são elementos de  $S$ ,  $S = V_1 \cup V_2$ , definidos como:

$$V_1 = \{v_1 : v_1 \in I\}$$

$$V_2 = \{v_2 : v_2 \notin I\}$$

$V_2$  contém os subconjuntos  $X_1$  e  $X_2$ , onde:

$$X_1 = \{x_1 : x_1 \notin I, I + x_1 \in \mathfrak{I}_1\}$$

$$X_2 = \{x_2 : x_2 \notin I, I + x_2 \in \mathfrak{I}_2\}$$

Sejam  $C_1(I, v_2)$  e  $C_2(I, v_2)$  os únicos circuitos de  $I+v_2$  em  $M_1$  e  $M_2$ , respectivamente.

As arestas de  $H$  seguem a seguinte lei de formação:

- Se  $x \in V_2$ ,  $I + x \notin \mathfrak{I}_1$  e  $y \in C_1(I, x)$ , criar aresta  $y \rightarrow x$  em  $H(V_1, V_2)$ ;
- Se  $x \in V_2$ ,  $I + x \notin \mathfrak{I}_2$  e  $y \in C_2(I, x)$ , criar aresta  $x \rightarrow y$  em  $H(V_1, V_2)$ .

Se for possível encontrar um caminho  $P_{\text{mínimo}}$  do conjunto  $X_1$  para  $X_2$  (seqüência de aumento), tem-se  $I' = I \Delta P_{\text{mínimo}}$ , cuja cardinalidade é uma unidade maior que  $I$ . Após a determinação de cada seqüência de

aumento obtida desta forma, o grafo  $H$  é remontado até que não seja mais possível encontrar um caminho do conjunto  $X_1$  para  $X_2$ , ou seja, verificam-se no máximo seqüências de troca entre  $V_1$  e  $V_2$ . Neste caso, alcançou-se a máxima cardinalidade do conjunto independente  $I \in \mathfrak{S}_1 \cap \mathfrak{S}_2$ .

Mostra-se na Figura 3.4 um grafo bipartido auxiliar  $H(V_1, V_2)$ , a partir do qual é possível constatar que: do subconjunto  $X_1$  apenas partem arestas direcionadas para  $V_1$ ; do subconjunto  $X_2$  apenas chegam arestas direcionadas de  $V_1$ ; os vértices pertencentes a  $X_1 \cap X_2$  não têm ligação com nenhum outro vértice. Verifica-se, neste caso particular, que o caminho  $P_{\text{mínimo}}$  do conjunto  $X_1$  para  $X_2$  se reduz ao vértice  $d$ , embora  $\{a, e, f\}$  também seja um caminho entre  $X_1$  e  $X_2$ . Portanto,  $I' = I \Delta P_{\text{mínimo}} = \{c, e, h\} \Delta \{d\} = \{c, d, e, h\}$  e a cardinalidade de  $I'$  é uma unidade maior que a cardinalidade de  $I$ .

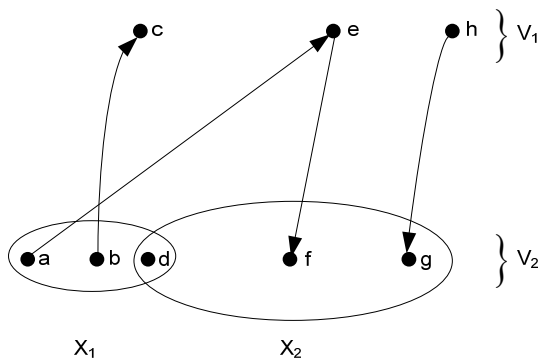


Figura 3.4 – Grafo Bipartido Auxiliar  $H(V_1, V_2)$

O conceito de seqüência de troca é ilustrado através das Figuras 3.5 e 3.6, mostradas a seguir. No grafo bipartido auxiliar  $H_1(V_1, V_2)$  apresentado na Figura 3.5 pode-se observar a existência de duas seqüências de troca  $\{a, e\}$  e  $\{b, c\}$ . Por sua vez, o grafo bipartido auxiliar  $H_2(V_1, V_2)$ , exibido na Figura 3.6, apresenta apenas uma seqüência de troca  $\{f, e, d, c, b, a\}$ . A existência de apenas seqüências de troca nos grafos bipartidos auxiliares  $H_1$  e  $H_2$  indica que a máxima

cardinalidade do conjunto independente  $I \in \mathfrak{I}_1 \cap \mathfrak{I}_2$  já foi alcançada em ambos os casos.

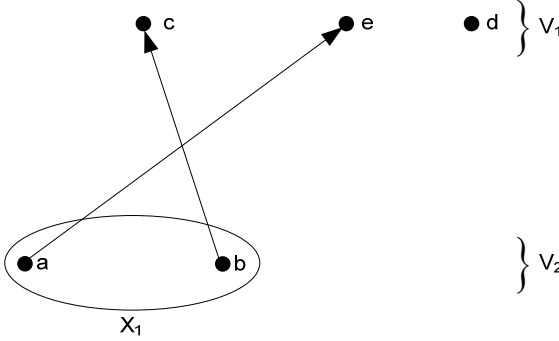


Figura 3.5 – Grafo Bipartido Auxiliar  $H_1(V_1, V_2)$  com Duas Seqüências de Troca

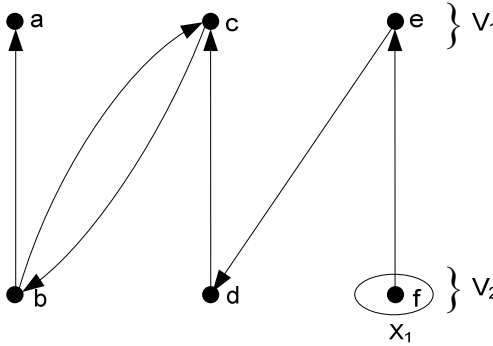


Figura 3.6 – Grafo Bipartido Auxiliar  $H_2(V_1, V_2)$  com Uma Seqüência de Troca

### 3.3.5 Determinação de Elementos Críticos de Interseção de Matróides (Piazza, 1989)

Seja  $I$  a interseção de dois matróides  $M_1 = (S, \mathfrak{I}_1)$  e  $M_2 = (S, \mathfrak{I}_2)$ . Um elemento de  $I$  é *crítico* se, após sua remoção de  $S$ , não for possível encontrar outra interseção de  $M_1$  e  $M_2$  com a mesma cardinalidade.

Para a determinação da interseção de cardinalidade  $I$  dos matróides  $M_1$  e  $M_2$ , recorre-se sucessivamente à busca de seqüências de aumento, até que se a máxima cardinalidade do conjunto independente seja encontrada. Nesta etapa do método, entretanto, é possível que se observe a existência de seqüências de troca. Nas seqüências de troca, os elementos de  $I$  são apenas remanejados, de modo que a cardinalidade de  $I$  permanece inalterada. Portanto, de acordo com a definição de elementos críticos de interseção de matróides, constata-se que um elemento de  $I$  é crítico se não puder ser incluído em nenhuma seqüência de troca.

De acordo com a lei de formação das arestas do grafo bipartido auxiliar  $H$ , nota-se que se o primeiro elemento de uma seqüência de troca pertencer a  $V_2$ , este elemento necessariamente deve estar contido em  $X_1$ . Por outro lado, se o primeiro elemento de uma seqüência de troca pertencer a  $V_1$ , então o último elemento da seqüência deve pertencer a  $X_2$ .

Denota-se por  $T$  o conjunto dos elementos de  $I$  contidos nas seqüências de troca encontradas. Os elementos de  $T$  são elementos não-críticos, os quais podem ser substituídos por elementos não pertencentes a  $I$  mantendo-se a cardinalidade da interseção. Por sua vez, *os elementos de  $I$  não pertencentes a  $T$  são elementos críticos de interseção de matróides.*

A definição de elementos críticos de interseção de matróides pode ser formalizada como:

$$\{\text{Elementos Críticos}\} = I \setminus T$$

Utilizando o exemplo apresentado na Figura 3.5, identificam-se as seqüências de troca  $\{a, e\}$  e  $\{b, c\}$ . Sendo  $I$  formado por  $\{c, d, e\}$ , obtém-se  $T = \{e, c\}$  e neste caso  $\{\text{Elementos Críticos}\} = I \setminus T = \{d\}$ .

Já para o exemplo indicado na Figura 3.6, onde a única seqüência de troca é dada por  $\{f, e, d, c, b, a\}$  e o conjunto  $I$  é formado pelos elementos  $\{a, c, e\}$ , tem-se que  $T = \{a, c, e\}$  é o próprio conjunto  $I$  e, portanto,  $\{\text{Elementos Críticos}\} = I \setminus T = \{\emptyset\}$ .

### 3.4 APLICAÇÃO DA TEORIA DE MATRÓIDES AO PROBLEMA DE OBSERVABILIDADE

#### 3.4.1 Formulação do Problema Utilizando o Grafo de Medição

A formulação do método de Quintana, Simões Costa e Mandel (1982) para análise da observabilidade topológica utiliza o conceito de *grafo de medição* associado a um dado plano de medição. Os vértices e arestas do grafo de medição são definidos como (Quintana, Simões Costa e Mandel, 1982):

- Os vértices do grafo de medição são os mesmos vértices do grafo da rede;
- Se o fluxo de potência no ramo  $i-j$  é medido, então os vértices  $i$  e  $j$  do grafo de medição serão conectados por uma aresta que estará associada àquela medida de fluxo (aresta de fluxo);
- Se a injeção de potência na barra  $i$  é medida, então o vértice  $i$  do grafo de medição será conectado a cada um de seus vértices adjacentes através de arestas, as quais estarão associadas a esta medida de injeção (arestas de injeção).

O grafo de medição  $Z$  é, portanto composto por todas as possíveis arestas que podem ser associadas às medidas do plano de medição sob análise. Em consequência da definição de  $Z$ , o problema de determinação da observabilidade topológica pode ser reformulado como o problema de busca por uma árvore geradora no grafo de medição, com a restrição de que não existam duas arestas associadas à mesma medida nesta árvore. Uma árvore com tais características é claramente uma Árvore Geradora Observável (AGO) do grafo de rede.

Em função do desacoplamento  $P-\delta$  e  $Q-V$ , os planos de medição de potência ativa e reativa são submetidos separadamente à análise de observabilidade. Portanto, quando não houver paridade entre as medidas ativas e reativas devem ser considerados dois grafos de medição, cada um deles associado a um dos problemas de observabilidade  $P-\delta$  e  $Q-V$ .

A Figura 3.8 mostra o grafo de medição  $Z$  associado ao sistema exemplo de 7 barras e ao plano de medição  $P-\delta$  (Allemong, Irisarri e Sasson, 1980) apresentado na Figura 3.7. As duas possíveis AGOs obtidas a partir do grafo de medição da Figura 3.8 são exibidas nas Figuras 3.9 e 3.10.



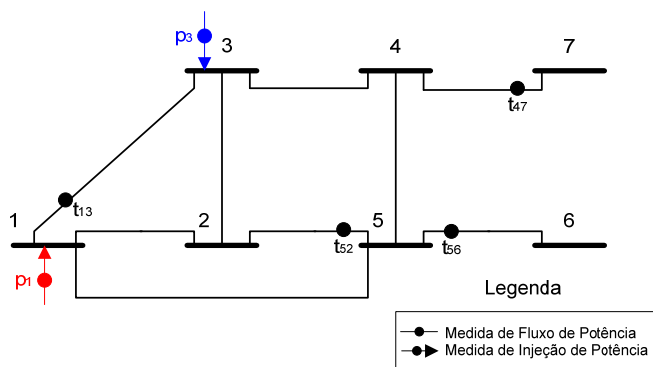


Figura 3.7 – Sistema Exemplo: Plano de Medição P- $\delta$

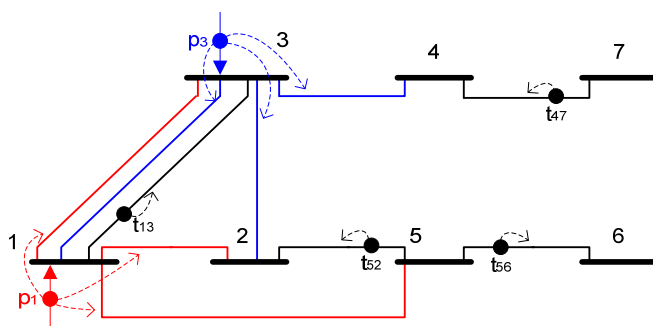


Figura 3.8 – Sistema Exemplo: Grafo de Medição P- $\delta$

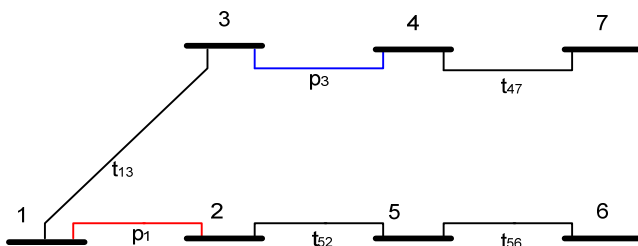


Figura 3.9 – Sistema Exemplo: AGO 1

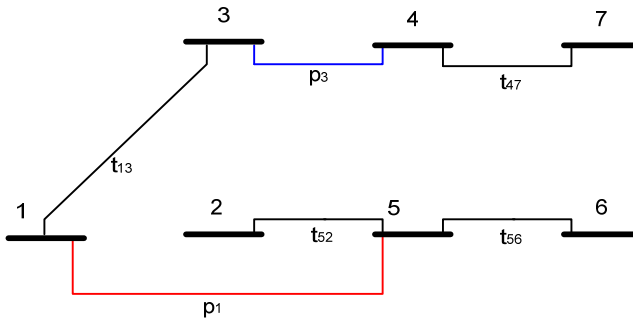


Figura 3.10 – Sistema Exemplo: AGO 2

Com relação às medidas de tensão, Clements, Krumpholz e Davis (1982) e Van Cutsem e Gailly (1983) demonstraram que tais medidas podem ser representadas, para efeito de análise de observabilidade topológica, por medidas de fluxo reativo em uma linha fictícia, de susceptância unitária, conectando a barra onde a tensão é medida a uma barra adicional fictícia (nó terra). Este artifício possibilita que as medidas  $Q-V$  sejam tratadas do mesmo modo que aquelas  $P-\delta$ , apesar da assimetria do plano de medidas devido à presença de medidas de magnitude de tensão, porém não de ângulo no sistema SCADA.

O método de solução do problema de observabilidade topológica originalmente proposto por Quintana, Simões Costa e Mandel (1982), o qual investiga a existência de uma árvore geradora no grafo de medição observando a restrição de que esta árvore não poderá conter mais do que uma aresta associada a uma dada medida, faz uso do método de interseção de matróides.

Na solução do problema de observabilidade topológica, a teoria de matróides une eficiência computacional e resultados precisos (Simões Costa, Piazza e Mandel, 1990).

### 3.4.2 Método de Busca de uma Árvore Geradora Observável no Grafo de Medição

A busca pelo conjunto de arestas do grafo de medição  $Z$  que simultaneamente satisfaz os requisitos de (i) formar uma árvore geradora (ii) que duas arestas desta árvore não devem estar associadas à mesma medida, é equivalente a determinação da interseção de dois matróides, cada um deles correspondendo a uma das restrições mencionadas.

Examinemos inicialmente a condição (i) acima. O requisito de que as arestas do grafo de medição  $Z$  devem formar uma árvore geradora pode ser adequadamente caracterizada pela estrutura de matróides. Nota-se que a busca por uma árvore geradora consiste essencialmente em se encontrar uma base para o *matróide do grafo*, introduzido no item 3.3.1. Neste caso,  $M_G = (S, \mathfrak{T}_G)$ , onde  $S$  é o conjunto de arestas do grafo de medição  $Z$  e  $\mathfrak{T}_G$  é o conjunto de árvores do grafo de medição  $Z$ .

Da mesma forma, um matróide pode ser utilizado para descrever a condição (ii) acima, ou seja, o requisito de que não podem existir duas arestas associadas a uma mesma medida. Neste caso, recorre-se ao exemplo de *matróide de partição* apresentado no item 3.3.2.

Para tal, considere que todas as *arestas de fluxo* do grafo de medição são pintadas com a *cor zero*. Por sua vez, o conjunto de arestas pintadas da cor  $i$ , para  $i = \{1, 2, \dots, l\}$ , onde  $l$  é o número de medidas de injeção, está associado a uma determinada medida de injeção.

O subconjunto  $I$  de arestas do grafo de medição será independente no que diz respeito ao matróide de partição, ou observável, se for possível associar a cada elemento de  $I$  uma medida distinta. Portanto, para caracterizar o matróide de partição  $M_p = (S, \mathfrak{T}_p)$ , o subconjunto  $I \in \mathfrak{T}_p$  poderá conter tantas arestas de *cor zero* quanto forem necessárias, porém as demais arestas deverão ser todas de cores diferentes (Quintana, Simões Costa e Mandel, 1982; Simões Costa, Piazza e Mandel, 1990).

A busca pelo conjunto simultaneamente independente com relação ao matróide do grafo  $M_G$  e ao matróide de partição  $M_p$ , com o maior número de elementos possível é, portanto, equivalente ao problema de interseção de matróides. Um conjunto  $I \in \mathfrak{T}_G \cap \mathfrak{T}_p$  é caracterizado como a interseção dos matróides  $M_G = (S, \mathfrak{T}_G)$  e  $M_p = (S, \mathfrak{T}_p)$  definidos sobre o mesmo conjunto  $S$  de arestas do grafo de medição, onde  $I$  é independente em ambos os matróides.

A interseção  $I$  dos matróides  $M_G$  e  $M_p$  resultará na existência de uma árvore geradora observável se a cardinalidade de  $I$  for igual a  $N - I(N)$  para o problema de observabilidade  $P - \delta(Q - I)$ , onde  $N$  é o número de barras da rede elétrica. Em caso contrário, o plano de medição é não-observável e a interseção  $I$  fornecerá a máxima floresta observável.

Em (Quintana, Simões Costa e Mandel, 1982) é apresentado de forma detalhada um método de interseção de matróides especializado para a solução do problema de busca de uma AGO no grafo de medição

para análise de observabilidade topológica. No fluxograma da Figura 3.11 ilustra-se simplificada a implementação deste algoritmo de busca da AGO no grafo de medição, o qual está dividido em duas grandes etapas: *processamento das arestas de fluxo* e *processamento das arestas de injeção*.

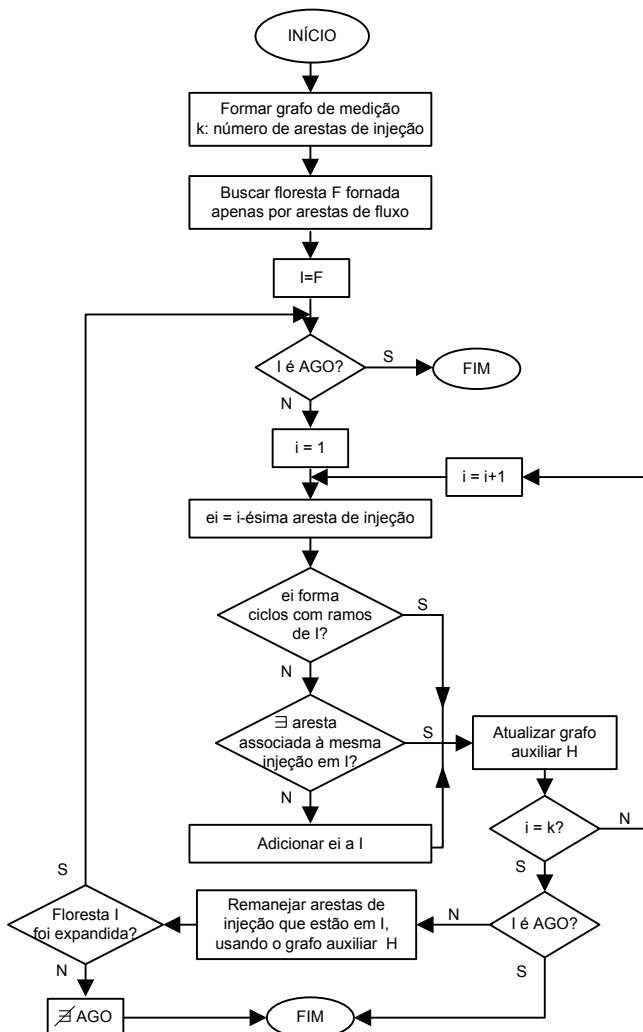


Figura 3.11 – Algoritmo de Busca da AGO para Análise de Observabilidade Topológica

Em função da correspondência biunívoca entre as medidas de fluxo e as arestas a elas associadas no grafo de medição  $Z$ , a primeira etapa do algoritmo consiste na busca de uma floresta observável  $F$  no subgrafo de  $Z$  formado apenas por arestas de fluxo. Se  $F$  for uma AGO, o sistema é topologicamente observável, sem a necessidade do processamento das arestas de injeção. Se  $F$  não for uma AGO, então  $F$  servirá de ponto de partida para a segunda etapa do algoritmo, onde as arestas de injeção são examinadas individualmente, na tentativa de se expandir  $F$ . Observa-se que as arestas de fluxo não utilizadas na primeira etapa do algoritmo podem ser descartadas para a análise de observabilidade, pois não contribuirão com a expansão de  $F$ .

Na segunda etapa do algoritmo utiliza-se o método de interseção dos matróides  $M_G = (S, \mathfrak{T}_G)$  e  $M_P = (S, \mathfrak{T}_P)$  delineado no item 3.3.4, sendo a floresta  $F$  tomada como o conjunto  $I$  inicial.

Uma aresta  $e_i$  de injeção é adicionada a  $I$  se não formar ciclo com os ramos de  $I$  e não existir em  $I$  aresta associada à mesma medida de injeção, ou seja, aresta da mesma cor. Uma vez que não se sabe a priori qual aresta associada a uma dada medida de injeção deve ser escolhida para propiciar a máxima expansão de  $I$ , um grafo bipartido auxiliar  $H(V_I, V_2)$  é sistematicamente construído para que as arestas de injeção incluídas em  $I$  possam ser posteriormente remanejadas, se necessário.

Os conjuntos de vértices  $V_I$  e  $V_2$  do grafo bipartido auxiliar correspondem a arestas de injeção e são definidos como:

$$V_I = \{v_1 : v_1 \in I\}$$

$$V_2 = \{v_2 : v_2 \notin I\}$$

$V_2$  contém os subconjuntos  $X_G$  e  $X_P$ , onde:

$X_P = \{x_P : x_P \notin I, I + x_P \in \mathfrak{T}_P\}$ , portanto, não existe em  $I$  nenhuma aresta associada à mesma medida de injeção de  $e_i$ .

$X_G = \{x_G : x_G \notin I, I + x_G \in \mathfrak{T}_G\}$ , ou seja,  $e_i$  forma o único caminho entre seus vértices terminais.

As arestas direcionadas de  $H$  seguem a seguinte lei de formação:

- Se  $y \in V_I$ ,  $x \in V_2$  e  $I + x \notin \mathfrak{T}_P$ , ou seja,  $x$  está associado à mesma medida de  $y$ , criar aresta  $y \rightarrow x$  em  $H(V_I, V_2)$ ;
- Se  $y \in V_I$ ,  $x \in V_2$  e  $I + x \notin \mathfrak{T}_G$ , ou seja,  $x$  forma um ciclo com  $y$ , criar aresta  $x \rightarrow y$  em  $H(V_I, V_2)$ .

Se, ao cabo do processamento de todas as arestas de injeção, uma AGO não for encontrada, o grafo auxiliar  $H$  é então utilizado com o objetivo de expandir a floresta corrente  $I$ .

Se for possível encontrar um caminho  $P_{\text{mínimo}}$  do conjunto  $X_P$  para  $X_G$  (seqüência de aumento), tem-se  $I' = I \Delta P_{\text{mínimo}}$ , cuja cardinalidade é uma unidade maior que  $I$ . O grafo  $H$  é então remontado consecutivamente até que não seja encontrado um caminho do conjunto  $X_P$  para  $X_G$  (verificam-se no máximo seqüências de troca). Neste caso, alcançou-se a máxima cardinalidade do conjunto independente  $I$ .

Caso a floresta não possa ser expandida mediante o uso do grafo  $H$ , é possível afirmar que não existe uma AGO, e que a floresta observável  $I$  atual é máxima. Sendo assim, o algoritmo desenvolvido em (Quintana, Simões Costa e Mandel, 1982) identificará as ilhas observáveis do sistema.

Observa-se que os planos de medição de potência ativa e reativa são submetidos separadamente ao algoritmo. Se existirem árvores geradoras observáveis para ambas as análises  $P-\delta$  e  $Q-V$ , o sistema de potência como um todo é considerado topologicamente observável com respeito ao plano de medição em questão.

### 3.5 APLICAÇÃO DA TEORIA DE MATRÓIDES AO PROBLEMA DE CRITICIDADE DE MEDIDAS

#### 3.5.1 Determinação de Medidas Críticas

A determinação de medidas críticas deve ser empregada somente se o plano de medição utilizado para a EESP for observável. Além disso, a busca por medidas críticas deve restringir-se ao subconjunto das arestas da AGO. Uma medida que não tem nenhuma aresta associada à AGO não pode ser crítica, pois sua retirada não ameaça a manutenção da observabilidade topológica.

Nota-se que o método de determinação de elemento crítico de interseção de matróides, apresentado no item 3.3.5, é perfeitamente aplicável ao problema determinação das medidas críticas que compõem o plano de medição. Este método de determinação de medidas críticas baseado na teoria de matróides foi proposto por Simões Costa, Piazza e Mandel (1990).

Como já exposto, um elemento de  $I$ , onde  $I$  é a interseção de dois matróides  $M_1 = (S, \mathfrak{T}_1)$  e  $M_2 = (S, \mathfrak{T}_2)$ , é crítico se após sua remoção

de  $S$  não for possível encontrar outra interseção de  $M_1$  e  $M_2$  com a mesma cardinalidade.

Desta forma, para a determinação das medidas críticas a partir do grafo bipartido auxiliar  $H(V_1, V_2)$ , faz-se uma busca pelas seqüências de troca em  $I$ , pois, de acordo com a definição de elementos críticos de interseção de matróides, um elemento de  $I$  é crítico se não puder ser incluído em nenhuma seqüência de troca.

Considerando que o plano de medição sob análise é observável e que já foi encontrada uma AGO correspondente, é possível se afirmar que os conjuntos  $X_G$  e  $X_P$  do item 3.4.2 são tais que, nesta etapa do método,  $X_G$  é vazio e  $X_P \subseteq V_2$ . As arestas direcionadas de  $H$  seguem a lei de formação discutida no mesmo item. As seqüências de aumento compreendem caminhos de  $X_P$  para  $X_G$ . Já no caso das seqüências de troca, os caminhos são de  $X_P$  para  $V_1$ , onde  $V_1$  é o próprio conjunto  $I$ .

Conforme definido no item 3.3.5, o conjunto  $T$  é formado pelos elementos de  $I$  contidos nas seqüências de troca encontradas. Os elementos de  $T$  são elementos não-críticos, porque podem ser substituídos por elementos não pertencentes a  $I$  mantendo-se a cardinalidade da interseção. Por sua vez, os elementos de  $I$  não pertencentes a  $T$  são elementos críticos de interseção de matróides.

Portanto, constata-se que:

$$\{\text{Medidas Críticas}\} = I \setminus T$$

De maneira mais informal, considere  $I$  um subconjunto do conjunto de arestas do grafo de medição  $Z$ , tal que  $I$  é composto pelas arestas que formam uma determinada AGO. Dentre todos os elementos de  $I$ , devem ser encontrados aqueles que podem ser substituídos pelos elementos do conjunto de arestas de  $Z$  não pertencentes a  $I$ , de forma que uma AGO ainda possa ser encontrada. Seja  $T$  o subconjunto de  $I$  formado pelas medidas substituíveis, as quais foram encontradas através da procura por seqüências de troca envolvendo as arestas de  $I$ . Então as arestas em  $I \setminus T$  correspondem às medidas críticas (Simões Costa, Piazza e Mandel, 1990).

### 3.5.2 Determinação de Conjuntos Críticos

Define-se um conjunto crítico como um subconjunto de medidas, tal que a perda de qualquer uma das medidas torna simultaneamente críticas todas as demais medidas do referido subconjunto (Mili, Van Cutsem e Ribbens Pavella, 1984).

Em (Simões Costa, 1988) e (Simões Costa, Piazza e Mandel, 1990), o método combinatório desenvolvido para a determinação de medidas críticas através da aplicação da teoria de matróides é utilizado para a identificação de conjuntos críticos. Os autores propõem a supressão do plano de medição de todas as medidas não-críticas, uma de cada vez, e a aplicação do método combinatório de determinação de medidas críticas para identificar quais medidas se tornaram críticas como consequência de cada supressão.

Todas as medidas que se configurarem críticas como consequência direta da retirada de uma determinada medida  $z$  do plano de medição, formam conjunto crítico com esta medida  $z$ .

Observa-se que uma medida crítica não pode fazer parte de nenhum conjunto crítico.

O método descrito de determinação de conjuntos críticos é enumerativo, pois se recorre sucessivamente ao método combinatório de determinação de medidas críticas. Para melhorar a eficiência computacional deste método é explorada a propriedade da reciprocidade e também alguns procedimentos heurísticos, cujos detalhes podem ser encontrados em (Piazza, 1990).

Elementos distintos pertencentes ao mesmo conjunto crítico satisfazem a *propriedade de reciprocidade*, no sentido de que se a medida  $z_i$  se torna crítica quando a medida  $z_j$  é eliminada, então  $z_j$  se tornará crítica se a medida  $z_i$  for eliminada (Simões Costa, Piazza e Mandel, 1990)

### 3.6 CONCLUSÕES

Apresentam-se neste capítulo conceitos e definições da teoria de matróides com aplicação em problemas correlatos à estimação de estados, como a análise de observabilidade topológica, determinação de medidas críticas e de conjuntos críticos. Descreve-se o problema de interseção de matróides e um método que se propõe a determinar a interseção de matróides de máxima cardinalidade.

A aplicação da teoria combinatória de matróides à solução do problema de observabilidade topológica, conforme proposto em (Quintana, Simões Costa e Mandel, 1992) é discutida e detalhada. Da mesma forma, apresentam-se os procedimentos de análise de criticidade do plano de medição formulados em termos da teoria de matróides nos



trabalhos de Simões Costa (1988) e Simões Costa, Piazza e Mandel (1990).



## CAPÍTULO 4

### TECNOLOGIA DO SISTEMA DE MEDIÇÃO FASORIAL SINCRONIZADA

#### 4.1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento da tecnologia do Sistema de Medição Fasorial Sincronizada (SMFS) e os principais elementos que o constituem são apresentados neste capítulo. Em seguida são abordadas as aplicações da tecnologia do SMFS, enfatizando-se sua utilização na estimação de estados.

O foco do capítulo é apresentar os conceitos necessários para a compreensão dos impactos da tecnologia do sistema de medição fasorial sincronizada na monitoração, especialmente no que diz respeito à estimação de estados, no controle e na supervisão do sistema elétrico.

#### 4.2 DESENVOLVIMENTO DA TECNOLOGIA DO SISTEMA DE MEDIÇÃO FASORIAL SINCRONIZADA

Potenciais aplicações de medições fasoriais sincronizadas nas mais diversas áreas de sistemas de energia elétrica têm sido bastante pesquisadas, em âmbito mundial, desde o desenvolvimento da tecnologia de Sistema de Medição Fasorial Sincronizada (SMFS).

Pesquisas sobre a tecnologia de medição fasorial tiveram início na década de 80. O primeiro protótipo de Unidade de Medição Fasorial (UMF) foi implementado na universidade *Virginia Polytechnic Institute and State University* (Virginia Tech), nos Estados Unidos. Contudo, os primeiros desenvolvimentos referentes à UMF e às aplicações da tecnologia de SMFS foram fortemente limitados pela infraestrutura

existente na época e a falta de suporte computacional para processamento das informações coletadas via rede (Decker *et al.*, 2009).

Destacam-se no desenvolvimento do SMFS os seguintes eventos (Phadke, 2002):

- Criação do relé de distância SCDR (*Symmetrical Component Distance Relay*);
- Sincronização do tempo de amostragem;
- Implementação do protótipo da UMF;
- Fabricação comercial da UMF;
- Instalações no campo;
- Pesquisas de aplicações.

A sincronização precisa das medidas fasoriais de instalações geograficamente distantes passou a ser possível com o sistema GPS (*Global Positioning System*). Atualmente, o SMFS, por utilizar uma fonte eficaz de sincronização, viabiliza a medição de grandezas fasoriais de tensão e corrente em instalações geograficamente distantes, a uma taxa de até 60 medidas por segundo e com precisão angular adequada aos requisitos da maioria das aplicações de monitoração e controle (Ehrensperger, 2004).

#### 4.3 ESTRUTURA DO SISTEMA DE MEDIÇÃO FASORIAL SINCRONIZADA

Um SMFS é constituído pela unidade de medição fasorial, pelo concentrador de dados e pelos canais de comunicação. A Figura 4.1 ilustra a estrutura geral de um sistema de medição fasorial sincronizada.

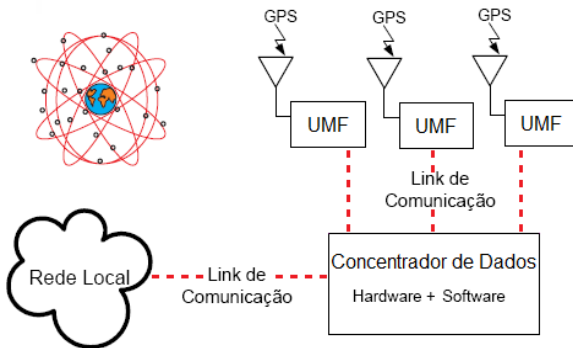


Figura 4.1 – Estrutura Geral de um SMFS (Ehrensperger, 2004)

Com relação à padronização do sistema de medição fasorial sincronizada, a referência é a norma IEEE C37.118 (IEEE, 2006). A IEEE C37.118, uma revisão da norma IEEE 1344 publicada em 1995, especifica formatos de dados e requisitos de sincronismo de modo a permitir a correlação de fasores provenientes de várias fontes e compará-los com dados similares de diferentes sistemas de medição. A norma versa sobre a definição de sincrofases, sincronismo no tempo, aplicação de etiquetas de tempo, métodos para verificar o atendimento das medidas à norma e formatos de mensagens para comunicação com uma UMF.

Na sequência apresentam-se pormenores da fonte de sincronização fornecida pelo sistema GPS e detalham-se os elementos que compõem a estrutura do SMFS.

#### **4.3.1 Fonte de Sincronização GPS**

O sistema GPS consiste de uma constelação de 24 satélites a 20.200 quilômetros de altitude, distribuídos em seis planos de órbita com 55° de inclinação. O posicionamento do plano orbital e o posicionamento dos satélites nas órbitas é tal que a qualquer instante entre cinco e oito satélites ficam à vista de qualquer ponto da Terra.

O canal para uso civil do sistema GPS transmite coordenadas de posicionamento dos satélites a partir das quais é possível determinar a localização na Terra de uma estação receptora. Adicionalmente, os satélites transmitem um sinal de pulso por segundo, com um identificador que pode ser interpretado pelas estações receptoras. A precisão temporal do canal para uso civil é da ordem de 1 microssegundo, mas na prática pode-se obter precisão maior (Hart *et al.*, 2001).

Os equipamentos receptores de sinal GPS utilizados para a sincronização de tempo em equipamentos disponibilizam um sinal de pulso por segundo e uma etiqueta de tempo com a data no formato completo. Este sinal de pulso é utilizado pelas UMFs como fonte de sincronização na aquisição de dados, tipicamente tensões trifásicas nas barras e correntes trifásicas nas linhas, transformadores e alimentadores das subestações.

Assumindo-se a frequência base de 60 Hz, um erro no pulso de sincronização de 1 microssegundo corresponde a 0,021 graus elétricos, o que satisfaz plenamente os requisitos de precisão exigidos para as aplicações atuais do SMFS (Phadke, 1993).

### 4.3.2 Unidade de Medição Fasorial

A aquisição dos sinais analógicos de corrente e tensão nas barras do sistema a partir dos secundários dos transformadores de corrente e de potencial é realizada pela UMF. As medidas de tensão e corrente são processadas pela UMF, convertidas em fasores e enviadas ao concentrador de dados a taxas que variam de 10 a 60 sincrofasores por segundo.

Na Figura 4.2 está representada a estrutura básica da unidade de medição fasorial. A obtenção de medidas fasoriais inicia-se com a filtragem dos sinais amostrados em uma referência temporal comum, visando evitar o efeito de *aliasing*, isto é, de criação de uma falsa frequência durante o processo de amostragem, devido à baixa taxa de amostragem.

Utilizando-se conversores analógico/digitais, os sinais de entrada de tensão e corrente são discretizados. A partir destes sinais discretizados, diferentes métodos podem ser empregados no tratamento das amostras. A Transformada Discreta de Fourier na sua forma recursiva é a ferramenta matemática atualmente mais utilizada para a conversão das amostras de tensão e corrente em fasores (Ehrensperger, 2004).

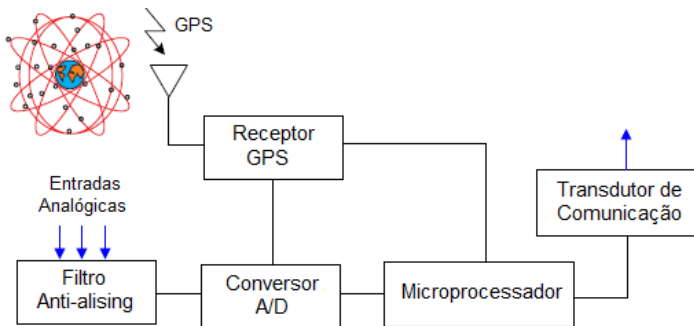


Figura 4.2 – Estrutura Básica da UMF (Ehrensperger, 2004)

### 4.3.3 Concentrador de Dados

O concentrador de dados tem a finalidade de receber as medidas fasoriais enviadas de forma contínua pelas UMFs e por outros concentradores de dados, organizando-as através das etiquetas de tempo, armazenando-as em uma base de dados própria e disponibilizando-as

para o uso em aplicações. Além disso, o concentrador de dados deve tratar eventuais erros de transmissão dos dados.

As funções básicas do concentrador de dados e a forma como este equipamento se relaciona com os demais componentes do SMFS podem ser visualizadas na Figura 4.3.

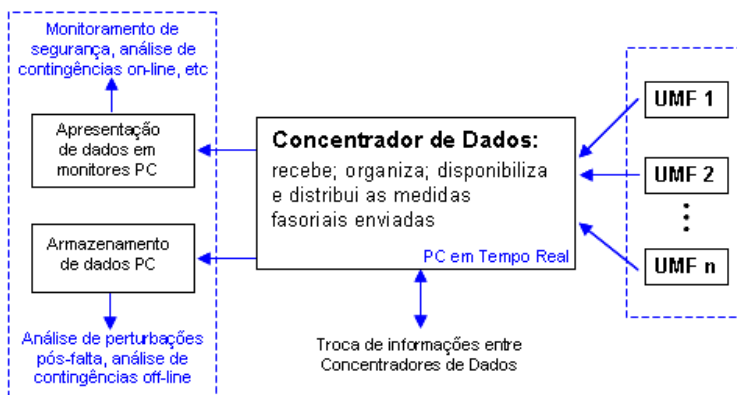


Figura 4.3 – Funções Básicas do Concentrador de Dados (Ehrensperger, 2004)

Observa-se que o concentrador de dados reúne todas as medidas de magnitude e ângulo das tensões nas barras obtidas, dispondo do estado do sistema em tempo real.

As funcionalidades executadas pelo concentrador de dados são implementadas em rotinas computacionais classificadas com níveis de alta, média e baixa prioridade, de modo a garantir que o equipamento desempenhe adequadamente seu papel fundamental: aquisição e tratamento dos dados (Ehrensperger, 2004).

#### 4.3.4 Canais de Comunicação

O objetivo dos canais de comunicação é a transferência de dados entre as UMFs e o concentrador ou entre diferentes concentradores. Seguindo o formato determinado pela norma IEEE C37.118, os fasores calculados pelas UMFs são enviados, por canais adequados de comunicação, ao concentrador de dados.

Os canais de comunicação considerados para uso no SMFS incluem opções de estruturas que operam tanto através de meios físicos específicos quanto através de tecnologia sem fio (Ehrensperger, 2004). Como meios físicos, citam-se como exemplos links de fibras óticas, par trançado, Power Line Communication (PLC), canais de microondas,

linhas telefônicas, entre outros. A seleção do canal de comunicação apropriado depende das exigências da aplicação considerada quanto à taxa de transferência e segurança do recebimento de dados.

#### 4.4 APLICAÇÕES DA TECNOLOGIA DE MEDIÇÃO FASORIAL SINCRONIZADA

As aplicações da tecnologia de medição fasorial sincronizada em sua maioria estão em fase de pesquisa e desenvolvimento. Apresentam-se a seguir algumas das aplicações no sistema elétrico relatadas na literatura técnica pertinente, as quais foram organizadas em três grandes áreas:

1. *Aplicações na Área de Monitoração* – objetivam fornecer dados que permitam avaliar o estado operativo do sistema em tempo real. Dentre as aplicações nesta categoria citam-se a estimação de estados, a análise de oscilações de baixa frequência em tempo real, o monitoramento da estabilidade de tensão e o monitoramento do estado de operação dos geradores (Santos, 2008). Como o enfoque deste trabalho de dissertação relaciona-se com a aplicação da tecnologia do SMFS na estimação de estados, esta aplicação é abordada com maiores detalhes no item 4.5.
2. *Aplicações na Área de Controle e Proteção* – têm por finalidade agregar melhorias aos sistemas de proteção e controle através da incorporação das inovações trazidas pela tecnologia do SMFS. Neste sentido, o SMFS pode ser aplicado no controle de emergência dos sistemas elétricos, na predição e controle da estabilidade angular, na identificação e localização de faltas e no controle automático de tensão.
3. *Aplicações na Validação de Modelos e Simulações* – visam à utilização dos dados oriundos do SMFS para validação de simulações, detecção de erros, identificação de parâmetros e aprimoramento dos modelos. Estas aplicações permitem reduzir as incertezas em simulações dinâmicas do sistema e, eventualmente, atualizar modelos e sistemas de controle e proteção (Santos, 2008).

No Brasil, destacam-se dois grandes projetos em desenvolvimento: o projeto de implantação do SMFS no Sistema Interligado Nacional (SIN) pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico



(ONS) (Moraes, Volskis e Hu, 2008), e o projeto Sistema de Medição Fasorial Sincronizada com Aplicações em Sistemas de Energia Elétrica – MedFasee, o qual teve início em 2003 através de uma parceria entre a Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e a empresa Reason Tecnologia S.A. (Lira *et al.*, 2010).

Em 2000, o ONS preparou uma primeira especificação para implantação do SMFS no SIN pretendendo aplicar esta tecnologia para registrar perturbações dinâmicas de longa duração no sistema elétrico. Após um período de descontinuidade do projeto devido a questões regulatórias e da própria tecnologia, a Resolução Normativa ANEEL 170/2005 regulamentou as responsabilidades e tarefas do ONS e dos Agentes na implementação do SMFS no Brasil (Moraes, Volskis e Hu, 2008).

O projeto Medfasee surgiu com o objetivo de desenvolver um protótipo de sistema de medição fasorial e de aplicações na monitoração e no controle da operação de sistemas de energia elétrica. O protótipo inicialmente desenvolvido no âmbito deste projeto constituía-se de três unidades de medição fasorial, conectadas à rede de baixa tensão nas capitais dos três estados do Sul do Brasil, e um concentrador de dados, localizado no LabPlan/UFSC (Decker *et al.*, 2006). Atualmente, unidades de medição fasorial se encontram instaladas na rede de baixa tensão de nove cidades do Brasil: Belém, Fortaleza, Porto Velho, Brasília, Itajubá, Rio de Janeiro, São Carlos, Curitiba e Florianópolis (Projeto Medfasee, 2009).

Como consequência do projeto Medfasee citam-se os trabalhos de pesquisa e desenvolvimento Medfasee Eletrosul, Medfasee Frequência e mais recentemente Medfasee CTEEP (Lira *et al.*, 2010; Decker *et al.*, 2009).

#### 4.5 UTILIZAÇÃO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO FASORIAL SINCRONIZADA NA ESTIMAÇÃO DE ESTADOS

##### 4.5.1 Estimadores Convencionais *versus* Estimadores Utilizando Medidas Fasoriais Sincronizadas

O Estimador de Estados convencional processa um conjunto redundante de telemidas, contaminadas por ruídos diversos, obtido através do sistema SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*). O sistema SCADA baseia-se em medidas convencionais, como

magnitude de tensão, injeção de potência ativa e reativa e fluxos de potência ativa e reativa. Por sua vez, o SMFS viabiliza a medição fasorial sincronizada de tensões e correntes para instalações localizadas em qualquer ponto do sistema elétrico. A Tabela 4.1 sumariza os tipos de medidas provenientes do SMFS e aquelas oriundas do sistema SCADA.

Tabela 4.1 – Lista das Medidas do SMFS e SCADA

<b>Medidas SMFS</b>	<b>Medidas SCADA</b>
Fasores de Tensão Nodal Fasores de Corrente nos Ramos	Magnitudes de Tensão Injeções de Potência Ativa Injeções de Potência Reativa Fluxos de Potência Ativa Fluxos de Potência Reativa

A medição direta do ângulo de tensão, não factível no sistema SCADA, introduz uma nova variável de grande importância no processo de EESP, já que esta é uma das variáveis de estado a ser estimada. Além disso, as medidas provenientes do SMFS possuem uma exatidão e uma taxa de amostragem bastante superior às medidas SCADA.

É importante notar que desde o início das pesquisas relacionadas ao SMFS são reconhecidos os impactos desta tecnologia no processo de estimação de estados. A utilização de UMFs em todas as barras do sistema a fim de se obter uma medição direta dos estados do sistema e um estimador de estados linear é sugerida nos trabalhos pioneiros de Thorp, Phadke e Karimi (1985) e Phadke, Thorp e Karimi (1986).

A possibilidade de obtenção direta do vetor de estados do sistema em tempo-real com a tecnologia do SMFS abre a possibilidade de supressão do processo de estimação de estados. Entretanto, apesar das vantagens vislumbradas com a medição direta dos estados do sistema, ao invés de estimá-los utilizando medições que são funções não lineares do estado, na grande maioria dos casos o número de UMFs instaladas no sistema ainda não é suficiente para atingir este objetivo (Zhou *et al.*, 2006). Além disso, a monitoração do sistema dependeria de medidas brutas oriundas de UMFs. Apesar da qualidade superior de tais medidas, elas não estão livres de contaminação por erros grosseiros (Vanfretti *et al.*, 2010). Como apenas a estimação de estados apresenta a capacidade de filtrar erros grosseiros, conclui-se não ser aconselhável prescindir desta função para a modelagem em tempo real confiável de sistemas de potência.

#### 4.5.2 Referência Angular na Estimação de Estados com Medidas Fasoriais Sincronizadas

Na estimação de estados convencional, com medidas SCADA, uma das barras do sistema é tomada como referência angular e tem seu valor de ângulo de fase de tensão arbitrariamente escolhido como zero. Deste modo, os demais ângulos de fase das tensões nodais estimados são calculados em relação à barra de referência. No caso de inexistência de medição direta dos ângulos de fase esta estratégia mostra-se adequada, uma vez que não se dispõe de qualquer informação sobre os valores absolutos dos ângulos.

O fato das UMFs fornecerem medidas de diferenças angulares entre as barras suscitou uma investigação detalhada sobre a definição e implementação da referência angular do sistema no âmbito do *Eastern Interconnect Phasor Project* (EIPP, 2005). A referência angular deve manter consistência com os demais ângulos de fase monitorados e apresentar confiabilidade, pois em caso de perda de referência todas as informações de fase angular das UMFs passam a ser inúteis para o processo de estimação de estados.

Os métodos estudados em (EIPP, 2005) são detalhados a seguir (Simões Costa, Meyer, Decker, 2008):

- *Barra Física com Backup* – utiliza como referência o ângulo de uma UMF selecionada. Quando ocorre falha na comunicação ou perda de sincronismo dessa UMF, a referência é transferida instantaneamente para outra UMF. A vantagem do método é a facilidade de implementação e a confiabilidade, caso sejam usadas várias UMFs como backup. A desvantagem é o salto nos valores de ângulo relativo que ocorre durante a mudança de referência.
- *Barra Virtual* – o ângulo de referência é a média dos ângulos de UMFs selecionadas. Se ocorrer a falha de alguma UMF, a média é realizada sobre as demais, mantendo a confiabilidade e evitando a mudança de UMF.
- *Barra Real com Cálculo Retroativo* – utiliza o ângulo de uma UMF selecionada e registra os ângulos de diversas UMFs vizinhas. No caso de falha da UMF selecionada, o seu ângulo é calculado com base nos ângulos das UMFs vizinhas. Embora possam ocorrer saltos do ângulo de referência durante falhas, esses saltos serão pequenos, já que o ângulo calculado será próximo ao ângulo verdadeiro.

- *Referência de Tempo* – utiliza o tempo do sistema como referência para calcular os ângulos. O tempo do sistema pode ser calculado globalmente através da frequência média ou localmente através da frequência local e depois filtrado para mitigar variações locais.

Outra forma de tratar o problema de definição da referência angular é apresentada em Zhu e Abur (2007). Os autores propõem uma formulação do problema de estimação de estados sem a escolha de uma barra do sistema como referência angular, dentre aquelas monitoradas por UMFs, ou utilização de uma referência angular virtual, estratégia vulnerável a inconsistências entre a referência angular arbitrariamente escolhida e as medições dos ângulos de fase disponibilizadas pelas UMFs. Neste sentido, as medidas fasoriais sincronizadas são tratadas da mesma forma que as medidas SCADA e a referência angular presente na formulação convencional da estimação de estados é eliminada.

#### **4.5.3 Considerações sobre Erros em Medidas Fasoriais Sincronizadas**

Além do número e localização das UMFs no sistema, as melhorias associadas à estimação de estados na presença da tecnologia do SMFS dependem fortemente da exatidão das medidas fornecidas pelas UMFs. A exatidão das medidas deve estar em conformidade com os requisitos mínimos exigidos pela norma C37.118. O critério de avaliação da qualidade das medidas fasoriais sincronizadas proposto pela norma detecta erros de sincronização no tempo e erros de estimação da magnitude e ângulo dos fasores.

Assim, a identificação e eventual correção dos principais erros que podem comprometer a qualidade das medidas e integridade das informações no SMFS são fundamentais. Como potenciais fontes de erro destacam-se os instrumentos de medição e todo o canal de instrumentação, a UMF (hardware) e os canais de comunicação envolvidos no processo (Leites, 2010).

Metodologias para quantificar e atenuar os impactos dos erros têm sido reportadas na literatura técnica (Lira, 2010; Vanfretti *et al.*, 2010; Meliopoulos *et al.*, 2007; Madani e Novosel, 2008). Além disso, várias referências tratam da estimação dos parâmetros de calibração dos instrumentos de medição, tais como Phadke *et al.* (2009), Zhong e Abur (2005) e Meliopoulos *et al.* (2005).

#### 4.5.4 Diferentes Tipos de Medidas Fasoriais de Corrente

Deve-se mencionar ainda que, na prática, as UMFs são produzidas por diversos fabricantes e eventualmente apresentam configurações diferentes. Dependendo do tipo de UMF utilizada, o número de canais para medição dos fasores de tensão e corrente pode variar. Algumas unidades dispõem de vários canais, o que permite em alguns casos que a UMF possa medir o fasor de tensão da barra e os fasores de corrente em todos os ramos incidentes na barra monitorada. Outras contam somente com um par de canais, viabilizando o processamento de uma medida fasorial de tensão e de uma medida fasorial de corrente por UMF (Emami, Abur e Galvan, 2008).

Neste trabalho admite-se a existência dos dois padrões de UMFs descritos. Para o primeiro, cujo termo adotado é UMF tipo 1, considera-se que o número de canais é suficiente para medir o fasor de tensão da barra e os fasores de corrente em todos os ramos incidentes da barra monitorada. O segundo modelo, referido aqui como UMF tipo 2, conta com um par de canais e, deste modo, permite a monitoração de apenas uma medida fasorial de tensão e de uma medida fasorial de corrente por UMF<sup>1</sup>.

#### 4.5.5 Diferentes Estruturas para a Inclusão de Medidas Fasoriais Sincronizadas na Estimação de Estados

Atualmente, um tema de grande interesse para a pesquisa na área é a forma de inclusão das medidas fasoriais no processo de estimação de estados. De modo geral, as metodologias propostas na literatura podem ser agrupadas em três vertentes (Zhao, 2006; Phadke, 2006; Zhou *et al.*, 2006; Leites, 2010):

1. *Processamento Exclusivo das Medidas Fasoriais* – neste caso o sistema deve ser observável considerando apenas as medidas provenientes das UMFs e o estimador de estados é linear;
2. *Processamento Conjunto das Medidas Fasoriais e Medidas SCADA (Estimador Híbrido)* – propõem-se alterações no estimador de estados convencional de modo a permitir o processamento em uma única etapa das medidas fasoriais e SCADA;

---

<sup>1</sup> Esta classificação é utilizada estritamente para caracterizar a existência de canais para múltiplas medições de corrente em ramos incidentes a uma barra, não tendo relação com classificações derivadas de normas que tratam da exatidão das UMFs.

3. *Pós-processamento das Medidas Fasoriais* – o estimador de estados convencional é mantido intacto e as medidas fasoriais são processadas em uma etapa posterior.

Os impactos que a inclusão das medidas fasoriais têm na performance do estimador de estados e a melhor estratégia de processamento a ser utilizada estão relacionados com as características do sistema sob análise e do seu estágio de desenvolvimento do SMFS (Leites, 2010).

#### 4.6 CONCLUSÕES

Neste capítulo, descrevem-se os principais elementos que compõem um sistema de medição fasorial sincronizada: a unidade de medição fasorial, o concentrador de dados e os canais de comunicação. A fonte de sincronização fornecida pelo sistema GPS também é apresentada.

A exatidão superior, a elevada taxa de amostragem e a sincronização das medidas são os grandes benefícios do SMFS que fazem com que as aplicações desta tecnologia sejam inúmeras. Com o objetivo de ilustrar a importância e melhorias associadas à utilização do SMFS nos sistemas de energia elétrica, citam-se alguns exemplos de aplicações em estágio de desenvolvimento nas áreas de monitoração, controle, proteção e na validação de modelos e de simulações. Por fim, trata-se com maior detalhamento do emprego do sistema de medição fasorial sincronizada na estimação de estados.

## **CAPÍTULO 5**

### **OBSERVABILIDADE DE REDES ELÉTRICAS E CRITICIDADE DE MEDIDAS NA PRESENÇA DE MEDIÇÕES FASORIAIS SINCRONIZADAS**

#### **5.1 INTRODUÇÃO**

Neste capítulo detalha-se a metodologia proposta para a extensão do algoritmo de observabilidade topológica e de determinação de medidas críticas e conjuntos críticos desenvolvido em (Quintana, Simões Costa e Mandel, 1982) e (Simões Costa, Piazza e Mandel, 1990), de modo a permitir a incorporação de medidas oriundas da tecnologia do SMFS aos planos de medição processados por este algoritmo.

Abordam-se os impactos da presença de medidas fasoriais sincronizadas na análise de observabilidade e criticidade de medidas e o tratamento proposto a estas medidas neste trabalho de dissertação.

#### **5.2 IMPACTO DAS MEDIDAS FASORIAIS SINCRONIZADAS SOBRE A OBSERVABILIDADE**

Dentre os benefícios do aproveitamento do SMFS para o processo de estimação de estados destacam-se a medição direta do ângulo de fase de tensão e de corrente, não disponível no sistema de medição convencional, a melhoria na redundância do plano de medição e a transformação do problema de estimação de estados não-linear em linear. Esta última passará a ser viável apenas quando o sistema se tornar completamente observável utilizando-se apenas medições fasoriais sincronizadas. No momento, observa-se que em função do

reduzido número de UMFs atualmente instaladas nos sistemas elétricos de potência, a abordagem inteiramente linear ainda se constitui em um benefício de longo prazo (Abur, 2009).

A disponibilização, pelas UMFs, de medidas fasoriais de corrente nos ramos incidentes às barras, além das tensões nodais complexas, desencadeou uma série de pesquisas relacionadas à alocação de UMFs no sistema de modo a torná-lo observável utilizando o menor número de unidades possível. Como exemplos, citam-se Mohammadi-Ivatloo e Hosseini (2008), Emami, Abur e Galvan (2008), Nuqui e Phadke (2002), Xu e Abur (2004), Baldwin *et al.* (1993).

Neste sentido, estudos de métodos de alocação de UMFs relatam que, para que um sistema seja observável utilizando apenas medidas fasoriais na EESP, sem considerar nenhuma redundância, UMFs precisam ser instaladas em no mínimo 30% das barras do sistema (Xu e Abur, 2004; Baldwin *et al.*, 1993), o que realmente representa um número significativo e de difícil alcance no futuro próximo.

Entretanto, ainda que o sistema não seja observável considerando somente medidas oriundas do SMFS, a incorporação de medidas fasoriais sincronizadas no processo de estimação de estados agrega melhorias à observabilidade do sistema e promove a redução do grau de criticidade de medidas.

Sabendo-se que o problema da observabilidade do sistema está relacionado com o número e localização das medidas, a simples adição de medidas fasoriais a um sistema observável, na presença de medidas SCADA, permite um aumento no nível de redundância do plano de medição. O nível de redundância do plano de medição determinará a existência ou não de medidas críticas e conjuntos críticos e também contribuirá para a detectabilidade e identificabilidade de medidas portadoras de erros grosseiros.

Por fim, para que seja possível a extensão do algoritmo de observabilidade e criticidade de medidas existente, é necessário reconhecer que se deve aplicar um tratamento adequado às medidas de ângulo de tensão e também às medidas fasoriais sincronizadas de correntes fornecidas pelo SMFS.



### 5.3 TRATAMENTO DAS MEDIDAS FASORIAIS DE TENSÃO E CORRENTE NA ANÁLISE DE OBSERVABILIDADE

A incorporação da medida de ângulo de fase da tensão requer modificações pontuais no estimador de estados, pois esta quantidade já é uma das variáveis de estado. Entretanto, a adição do fasor de corrente implica em modificações mais complexas.

Para facilitar a compreensão do tratamento proposto, a estrutura da matriz Jacobiana considerando medidas fasoriais de tensão e de corrente é apresentada na Figura 5.1.

$$\begin{array}{c}
 \begin{array}{cc}
 & \delta & V \\
 \begin{array}{c} P \\ Q \\ T \\ U \\ \delta \\ V \\ I \\ \theta \end{array} & \left[ \begin{array}{cc|cc}
 \frac{\partial P}{\partial \delta} & & \frac{\partial P}{\partial V} & \\
 \hline
 \frac{\partial Q}{\partial \delta} & & \frac{\partial Q}{\partial V} & \\
 \hline
 \frac{\partial T}{\partial \delta} & & \frac{\partial T}{\partial V} & \\
 \hline
 \frac{\partial U}{\partial \delta} & & \frac{\partial U}{\partial V} & \\
 \hline
 E_{\delta} & & 0 & \\
 \hline
 0 & & E_V & \\
 \hline
 \frac{\partial I}{\partial \delta} & & \frac{\partial I}{\partial V} & \\
 \hline
 \frac{\partial \theta}{\partial \delta} & & \frac{\partial \theta}{\partial V} & 
 \end{array} \right]
 \end{array}
 \end{array}$$

Figura 5.1 – Estrutura da Matriz Jacobiana (Zhu e Abur, 2007)

onde:

$P$  e  $Q$ : medidas de injeção de potência ativa e reativa;

$T$  e  $U$ : medidas de fluxo de potência ativa e reativa;

$V$  e  $\delta$ : medidas de módulo e ângulo de tensão;

$I$  e  $\theta$ : medidas de módulo e ângulo de corrente;

$E_{\delta}$  e  $E_V$  são matrizes com a seguinte estrutura:

$$E = \begin{bmatrix} 0 & \cdots & 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & & \vdots & & & & \vdots & & & & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix}$$

sendo que os elementos unitários em cada linha da matriz  $E_\delta$  ( $E_V$ ) localizam-se nas colunas correspondentes às barras nas quais a fase da tensão  $\delta$  (a magnitude da tensão  $V$ ) é medida.

### 5.3.1 Modelagem de Medidas de Ângulo de Fase das Tensões Nodais

Observa-se que na formulação da matriz Jacobiana (Figura 5.1) o tratamento da medida de ângulo de tensão é análogo ao da medida de magnitude de tensão. Deste modo, o método de modelagem das medidas de ângulo de tensão para a análise da observabilidade topológica é análogo ao procedimento adotado para as medidas de magnitude de tensão.

Considerando o desacoplamento  $P$ - $\delta$  e  $Q$ - $V$  (Krumpholz, Clements e Davis, 1980) na forma linearizada, o problema de análise de observabilidade é decomposto em (ver item 2.4.2):

$$\Delta z_p = H_{p\delta} \Delta \delta + \eta_p$$

$$\Delta z_q = H_{qV} \Delta V + \eta_q$$

Na Figura 5.2 apresenta-se a estrutura de uma possível submatriz  $H_{qV}$ . Para simplificar a análise de observabilidade, supõe-se que todos os ramos têm susceptância unitária e assume-se que todas as tensões nodais têm magnitudes iguais a 1,0 pu e ângulos de fase iguais a 0 radianos. Além disso, as admitâncias em derivação das linhas são desprezadas.

$$H_{QV} = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & \dots & N \end{matrix} \\ \begin{matrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_N \\ U_{12} \\ U_{2N} \\ \vdots \\ Q_N \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 1 \\ 1 & -1 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & \dots & -1 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & -1 & \dots & 3 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

Figura 5.2 – Submatriz  $H_{QV}$

Conforme mencionado no item 2.4.3, a estrutura de  $H_{QV}$  permite constatar que uma medida de magnitude de tensão contém informação apenas sobre a barra onde a medição é realizada. Já uma medida de fluxo de potência em um ramo relaciona as tensões correspondentes às barras terminais deste ramo.

Utilizando-se o artifício proposto em (Clements, Krumpholz e Davis, 1982; Van Cutsem e Gailly, 1983), no que diz respeito à análise de observabilidade topológica as medidas de magnitude de tensão podem ser representadas como medidas de fluxo reativo em uma linha fictícia, de susceptância unitária, conectando a barra onde a tensão é medida a uma barra adicional fictícia (nó terra). Neste caso, a submatriz  $H_{QV}$  mostrada na Figura 5.2 tem a seguinte forma:

$$H_{QV}' = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & \dots & N & N+1 \end{matrix} \\ \begin{matrix} V_1' \\ V_2' \\ \vdots \\ V_N' \\ U_{12} \\ U_{2N} \\ \vdots \\ Q_N \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 & -1 \\ 0 & 1 & \dots & 0 & -1 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 1 & -1 \\ 1 & -1 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & \dots & -1 & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & 0 \\ 0 & -1 & \dots & 3 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

Figura 5.3 – Submatriz  $H_{QV}'$

Observa-se que as configurações das linhas das submatrizes  $H_{QV}$  e  $H_{QV}'$  (onde as medidas de magnitude de tensão foram substituídas por medidas de fluxo de potência reativa em linhas fictícias) são essencialmente as mesmas, atestando a validade do artifício utilizado.

Em termos de grafo da rede, as Figuras 5.4 e 5.5 ilustram a associação das medidas às arestas do grafo, para um sistema de 6 barras, cujo plano de medição  $Q-V$  é composto por quatro medidas de fluxo de potência e duas medidas de magnitude de tensão.

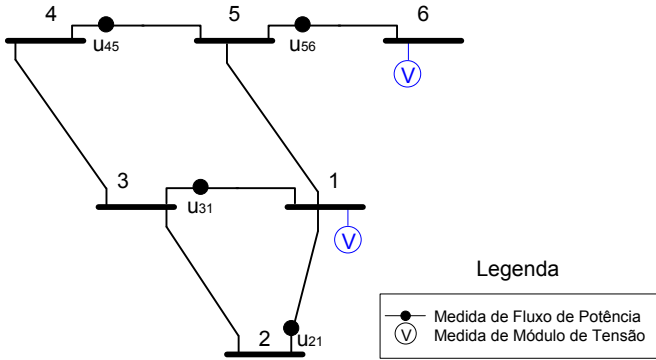


Figura 5.4 – Sistema de 6 Barras: Plano de Medição  $Q-V$

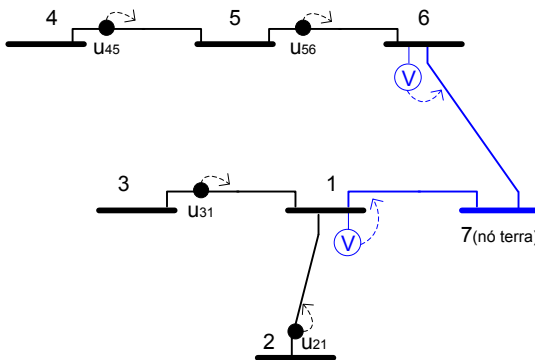


Figura 5.5 – Sistema de 6 Barras: Associações de Medidas a Arestas

O procedimento adotado nesta dissertação para a modelagem de medidas de ângulo de fase das tensões nodais para análise da

observabilidade topológica é análogo àquele adotado para as medidas de magnitude de tensão: introduz-se uma barra adicional fictícia (nó terra) e substitui-se cada medida de ângulo de tensão por uma medida de fluxo de potência ativa equivalente na linha fictícia, de susceptância unitária, que conecta a barra onde o ângulo está sendo monitorado e a barra adicional.

Exemplos de submatrizes  $H_{P\delta}$  e  $H_{P\delta}'$  (onde as medidas de ângulo de tensão foram substituídas por medidas de fluxo de potência ativa em linhas fictícias) são mostrados nas Figuras 5.6 e 5.7. Novamente, para simplificar a descrição do procedimento supõe-se que todos os ramos, isto é, não apenas os ramos fictícios descritos acima, têm susceptância unitária e assume-se que todas as tensões nodais têm magnitudes iguais a 1,0 pu e ângulos de fase iguais a 0 radianos.

$$H_{P\delta} = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & \dots & N \end{matrix} \\ \begin{matrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \vdots \\ \delta_N \\ T_{12} \\ T_{2N} \\ \vdots \\ P_N \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 1 \\ 1 & -1 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & \dots & -1 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & -1 & \dots & 3 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

Figura 5.6 – Submatriz  $H_{P\delta}$

$$H_{P\delta}' = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & \dots & N & N+1 \end{matrix} \\ \begin{matrix} \delta_1' \\ \delta_2' \\ \vdots \\ \delta_N' \\ T_{12} \\ T_{2N} \\ \vdots \\ P_N \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 & -1 \\ 0 & 1 & \dots & 0 & -1 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 1 & -1 \\ 1 & -1 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & \dots & -1 & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & 0 \\ 0 & -1 & \dots & 3 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

Figura 5.7 – Submatriz  $H_{P\delta}'$

### 5.3.2 Modelagem de Medidas Fasoriais de Corrente

A Figura 5.8 apresenta de forma detalhada a estrutura da matriz Jacobiana para as medidas fasoriais de corrente  $I \angle \theta$  e para as medidas de fluxo de potência ativa ( $T$ ) e reativa ( $U$ ).

$$\begin{array}{c}
 \begin{array}{ccccc}
 & \delta_i & \cdots & \delta_k & V_i & \cdots & V_k \\
 T_{ik} & \left[ \begin{array}{ccc|ccc}
 \frac{\partial T_{ik}}{\partial \delta_i} & \cdots & \frac{\partial T_{ik}}{\partial \delta_k} & \frac{\partial T_{ik}}{\partial V_i} & \cdots & \frac{\partial T_{ik}}{\partial V_k} \\
 \hline
 \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\
 \hline
 \frac{\partial U_{ik}}{\partial \delta_i} & \cdots & \frac{\partial U_{ik}}{\partial \delta_k} & \frac{\partial U_{ik}}{\partial V_i} & \cdots & \frac{\partial U_{ik}}{\partial V_k} \\
 \hline
 \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\
 \hline
 \frac{\partial I_{ik}}{\partial \delta_i} & \cdots & \frac{\partial I_{ik}}{\partial \delta_k} & \frac{\partial I_{ik}}{\partial V_i} & \cdots & \frac{\partial I_{ik}}{\partial V_k} \\
 \hline
 \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\
 \hline
 \frac{\partial \theta_{ik}}{\partial \delta_i} & \cdots & \frac{\partial \theta_{ik}}{\partial \delta_k} & \frac{\partial \theta_{ik}}{\partial V_i} & \cdots & \frac{\partial \theta_{ik}}{\partial V_k}
 \end{array} \right] \\
 \vdots \\
 U_{ik} \\
 \vdots \\
 I_{ik} \\
 \vdots \\
 \theta_{ik}
 \end{array}
 \end{array}$$

Figura 5.8 – Detalhamento da Estrutura da Matriz Jacobiana para  $I \angle \theta$  e  $T, U$

Na presença de medidas fasoriais de corrente, o desacoplamento do problema de observabilidade  $P$ - $\delta/Q$ - $V$  não é imediato. Isto pode ser inferido observando-se as expressões correspondentes às primeiras derivadas do fasor de corrente na matriz Jacobiana (Zhu e Abur, 2007a):

$$\frac{\partial I_{ik}}{\partial \delta_i} = \frac{1}{V_i} \left( \frac{T_{ik}}{S_{ik}} \frac{\partial T_{ik}}{\partial \delta_i} + \frac{U_{ik}}{S_{ik}} \frac{\partial U_{ik}}{\partial \delta_i} \right) \quad (5.1)$$

$$\frac{\partial I_{ik}}{\partial \delta_k} = \frac{1}{V_i} \left( \frac{T_{ik}}{S_{ik}} \frac{\partial T_{ik}}{\partial \delta_k} + \frac{U_{ik}}{S_{ik}} \frac{\partial U_{ik}}{\partial \delta_k} \right) \quad (5.2)$$

$$\frac{\partial I_{ik}}{\partial V_i} = \frac{1}{V_i} \left( \frac{T_{ik}}{S_{ik}} \frac{\partial T_{ik}}{\partial V_i} + \frac{U_{ik}}{S_{ik}} \frac{\partial U_{ik}}{\partial V_i} \right) - \frac{S_{ik}}{V_i^2} \quad (5.3)$$

$$\frac{\partial I_{ik}}{\partial V_k} = \frac{1}{V_i} \left( \frac{T_{ik}}{S_{ik}} \frac{\partial T_{ik}}{\partial V_k} + \frac{U_{ik}}{S_{ik}} \frac{\partial U_{ik}}{\partial V_k} \right) \quad (5.4)$$

$$\frac{\partial \theta_{ik}}{\partial \delta_i} = 1 - \frac{1}{S_{ik}^2} \left( T_{ik} \frac{\partial U_{ik}}{\partial \delta_i} - U_{ik} \frac{\partial T_{ik}}{\partial \delta_i} \right) \quad (5.5)$$

$$\frac{\partial \theta_{ik}}{\partial \delta_k} = -\frac{1}{S_{ik}^2} \left( T_{ik} \frac{\partial U_{ik}}{\partial \delta_k} - U_{ik} \frac{\partial T_{ik}}{\partial \delta_k} \right) \quad (5.6)$$

$$\frac{\partial \theta_{ik}}{\partial V_i} = -\frac{1}{S_{ik}^2} \left( T_{ik} \frac{\partial U_{ik}}{\partial V_i} - U_{ik} \frac{\partial T_{ik}}{\partial V_i} \right) \quad (5.7)$$

$$\frac{\partial \theta_{ik}}{\partial V_k} = -\frac{1}{S_{ik}^2} \left( T_{ik} \frac{\partial U_{ik}}{\partial V_k} - U_{ik} \frac{\partial T_{ik}}{\partial V_k} \right) \quad (5.8)$$

onde  $S_{ik}$  é a magnitude do fluxo de potência complexo da barra  $i$  para a barra  $k$ .

As equações acima mostram que, se não forem feitas considerações e/ou aproximações adicionais (Zhu e Abur, 2007b), o desacoplamento  $P$ - $\delta$  $Q$ - $V$  não se mostra viável.

Por outro lado, comparando-se as estruturas das linhas da matriz Jacobiana correspondentes às medidas fasoriais de corrente  $I \angle \theta$ , as quais são expressas pelas equações 5.1 a 5.8, com as estruturas das linhas da matriz Jacobiana associadas às medidas de fluxo de potência ativa ( $T$ ) e reativa ( $U$ ), pode-se concluir que, estruturalmente, medidas de  $I \angle \theta$  são equivalentes a medidas do par  $(T, U)$  realizadas sobre os mesmos ramos da rede.

Conseqüentemente, as medidas fasoriais de corrente na análise da observabilidade topológica podem ser processadas de forma similar a medidas de fluxo de potência tomadas aos pares ativo e reativo sobre o mesmo ramo.

Como resultado desta constatação, adota-se neste trabalho o procedimento de gerar, para cada ramo monitorado por medida fasorial de corrente, arestas no grafo de medição de forma similar às arestas correspondentes a medidas de fluxo de potência tomadas aos pares ativo e reativo sobre o mesmo ramo da rede, conforme descrito no item 2.4.3. Esta contribuição das medidas fasoriais de corrente para o grafo de medição evidentemente influenciará o resultado da busca por uma AGO empreendida pelo algoritmo apresentado no capítulo 3, conforme detalhado a seguir.

## 5.4 EXTENSÃO DO ALGORITMO DE OBSERVABILIDADE TOPOLÓGICA E CRITICIDADE DE MEDIDAS

### 5.4.1 Extensão do Algoritmo de Análise Topológica de Observabilidade

A extensão do algoritmo de observabilidade topológica desenvolvido em (Quintana, Simões Costa e Mandel, 1982) consiste na incorporação das medidas fasoriais sincronizadas de tensão e corrente fornecidas pelo SMFS, as quais são modeladas conforme descrito no item 5.3.

A análise de observabilidade topológica baseia-se no conceito de grafo de medição, cujos vértices são os mesmos vértices do grafo da rede e as arestas são determinadas de acordo com o plano de medição. A determinação da observabilidade topológica fundamenta-se na busca por uma árvore geradora observável no grafo de medição, isto é, na busca por uma árvore geradora que não contenha mais do que uma aresta associada a uma dada medida.

O algoritmo de busca por uma AGO no grafo de medição utiliza o método de interseção de matróides especializado apresentado no item 3.4. Este algoritmo está dividido em duas grandes etapas: processamento das arestas de fluxo e processamento das arestas de injeção.

Observa-se que na extensão do algoritmo de observabilidade topológica a etapa de processamento das arestas de injeção não é alterada. As medidas fasoriais sincronizadas provenientes das UMFs são de forma geral tratadas como medidas de fluxo, pois:

- i) As medidas fasoriais de ângulos de fase das tensões nodais são representadas por medidas de fluxo de potência ativa em ramos fictícios que conectam as respectivas barras a um nó terra (ver item 5.3.1);
- ii) As medidas fasoriais de corrente são processadas como medidas de fluxo de potência tomadas aos pares ativo e reativo (ver item 5.3.2).

Portanto, as medidas fasoriais sincronizadas de tensão nodal e corrente nos ramos são modeladas como medidas de fluxo e processadas na primeira etapa do algoritmo de observabilidade topológica.



### 5.4.2 Extensão da Análise de Criticidade para o Tratamento de Medidas Fasoriais Sincronizadas

No método de determinação de medidas críticas e conjuntos críticos proposto por Simões Costa, Piazza e Mandel (1990), que do mesmo modo emprega a teoria de interseção de matróides, também são necessárias algumas adaptações de forma a permitir o processamento das medidas fasoriais de tensão e corrente. Estas adaptações dizem respeito à montagem das arestas do grafo de medição, do grafo bipartido auxiliar e à busca por seqüências de troca.

Nota-se que a análise de criticidade de medidas é executada somente se o plano de medição utilizado para a EESP for previamente observável.

### 5.4.3 Considerações Adicionais

Deve-se ainda mencionar que a extensão do algoritmo de observabilidade topológica proposta considera a existência dos dois padrões de unidades de medição fasorial descritos no item 4.5.4, quais sejam:

- i) *UMF tipo 1* – dispõe de um número de canais suficiente para medir o fasor de tensão da barra e os fasores de corrente em todos os ramos incidentes da barra monitorada
- ii) *UMF tipo 2* – dispõe de um par de canais e permite apenas a monitoração de uma medida fasorial de tensão e de uma medida fasorial de corrente.

Além disso, não são impostas restrições aos tipos de medidas que compõem o plano de medição, sendo aceitas:

- Medidas SCADA de magnitude de tensão;
- Medidas SCADA de injeção de potência ativa e reativa;
- Medidas SCADA de fluxo de potência ativa e reativa;
- Medidas fasoriais sincronizadas de tensão fornecidas por UMFs do tipo 1 e UMFs do tipo 2;
- Medidas fasoriais sincronizadas de corrente fornecidas por UMFs do tipo 1 e UMFs do tipo 2.

A análise da observabilidade topológica e criticidade de medidas considerando a presença de medidas fasoriais sincronizadas é implementada mediante um aplicativo computacional desenvolvido nesta dissertação, denominado PLAMED-F, que consiste na extensão do aplicativo PLAMED anteriormente desenvolvido para processar apenas

medidas SCADA. O detalhamento da implementação computacional é apresentado no próximo capítulo.

Neste trabalho, devido à forma de inclusão de medidas fasoriais de corrente, não será utilizado o desacoplamento  $P-\delta/Q-V$  (Krumpholz, Clements e Davis, 1980) para a solução do problema de observabilidade. Assim, conclusões sobre a observabilidade e criticidade de medidas são obtidas a partir de uma única aplicação do PLAMED-F ao plano de medição sob análise.

## 5.5 CONCLUSÕES

Neste capítulo são discutidos os impactos da presença de medidas fasoriais sincronizadas na formulação do problema de análise de observabilidade e criticidade de medidas e o tratamento proposto às medidas fasoriais sincronizadas de tensão nodal e corrente nos ramos para permitir a extensão do eficiente algoritmo combinatório para a determinação da observabilidade topológica e da criticidade de medidas desenvolvido em (Quintana, Simões Costa e Mandel, 1982) e (Simões Costa, Piazza e Mandel, 1990).

Mostra-se que as medidas fasoriais de ângulos de fase das tensões nodais podem ser representadas por medidas de fluxo de potência ativa em ramos fictícios que conectam as respectivas barras a um nó terra e que as medidas fasoriais de corrente podem ser processadas como medidas de fluxo de potência tomadas aos pares ativo e reativo.

## **CAPÍTULO 6**

### **IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL**

#### **6.1 INTRODUÇÃO**

Este capítulo trata da implementação computacional do programa de análise de observabilidade de redes elétricas e criticidade de medidas na presença de medidas fasoriais sincronizadas de tensão e de corrente no plano de medição – PLAMED-F.

São descritos os aspectos gerais do desenvolvimento dos algoritmos de análise da observabilidade topológica, análise de criticidade de medidas e determinação de conjuntos críticos. Apresenta-se também a interface gráfica criada e os dados de entrada e de saída necessários para execução do programa.

#### **6.2 DADOS DE ENTRADA E SAÍDA**

##### **6.2.1 Dados de entrada**

Os dados de entrada do aplicativo PLAMED-F, que devem ser fornecidos pelo usuário em um arquivo com extensão DAD (ou através da interface gráfica apresentada no item 6.6), referem-se à topologia da rede e ao plano de medição sob análise. O arquivo com os dados de entrada é composto pelas seguintes informações:

- Número de barras e número de ramos da rede elétrica;
- Número de UMFs do tipo 1 e número de UMFs do tipo 2 instaladas no sistema;

- Número de medidas de injeção de potência ativa, número de medidas de injeção de potência reativa e número de medidas de tensão;
- Vetor UMF1 com os números das barras onde estão instaladas as UMFs do tipo 1;
- Vetor IP (IQ) com os números das barras onde a injeção de potência ativa (reativa) é monitorada;
- Vetor IV com os números das barras onde a magnitude de tensão é monitorada;
- Vetores Barra:A e Barra:B com as barras terminais correspondentes a cada ramo da rede elétrica;
- Vetores T:A e T:B (U:A e U:B), os quais indicam, para cada ramo, se há medição de fluxo de potência ativa (reativa) em uma das extremidades do ramo ou em ambas;
- Vetores UMF2:A e UMF2:B, os quais indicam, para cada ramo, se há UMF do tipo 2 monitorando a corrente fasorial em uma das extremidades do ramo e também o número da barra onde está instalada a UMF do tipo 2.

Se existirem pseudomedidas, também devem ser inseridas no arquivo de dados as informações listadas abaixo:

- Número de pseudomedidas de injeção de potência ativa e reativa e número de pseudomedidas de fluxo de potência ativa e reativa;
- Vetor PSMP (PSMQ) com os números das barras onde há pseudomedidas de injeção de potência ativa (reativa);
- Vetor PSMT (PSMU) com os números dos ramos onde há pseudomedidas de fluxo de potência ativa (reativa).

Neste caso, o usuário tem ainda a opção de selecionar se deseja que as medidas críticas sejam determinadas mesmo que haja alocação de pseudomedidas para garantir a observabilidade do sistema.

## 6.2.2 Dados de Saída

No que diz respeito ao arquivo de saída disponibilizado pelo programa, são oferecidas ao usuário duas opções para a forma de impressão neste arquivo:

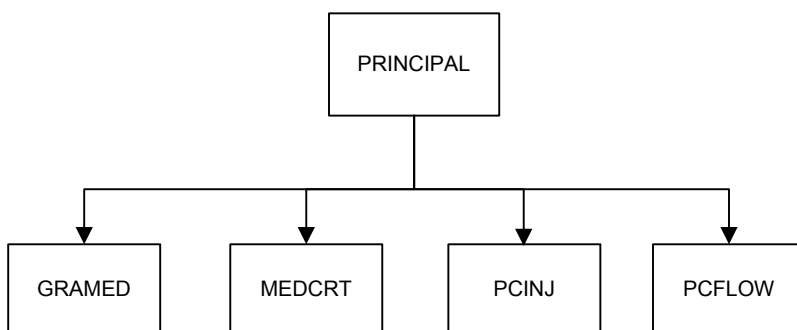
- i) *Simplificada* – apenas as mensagens principais de saída do programa são exibidas, ou seja, resultado da análise de observabilidade da rede elétrica e da criticidade de medidas.
- ii) *Completa* – além das mensagens principais são impressos no arquivo os dados de entrada do programa e a árvore observável

encontrada, ou floresta maximal (de acordo com o resultado da análise de observabilidade  $P\text{-}\delta/Q\text{-}V$ ).

### 6.3 IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL DO ALGORITMO DE OBSERVABILIDADE TOPOLÓGICA E CRITICIDADE DE MEDIDAS

O algoritmo desenvolvido para a análise da observabilidade topológica de redes elétricas e criticidade de medidas será a seguir representado através dos diagramas de bloco com as sub-rotinas mais importantes que o compõem.

As sub-rotinas chamadas pelo programa principal são apresentadas na Figura 6.1.



*Figura 6.1 – Sub-rotinas Chamadas pelo Programa Principal*

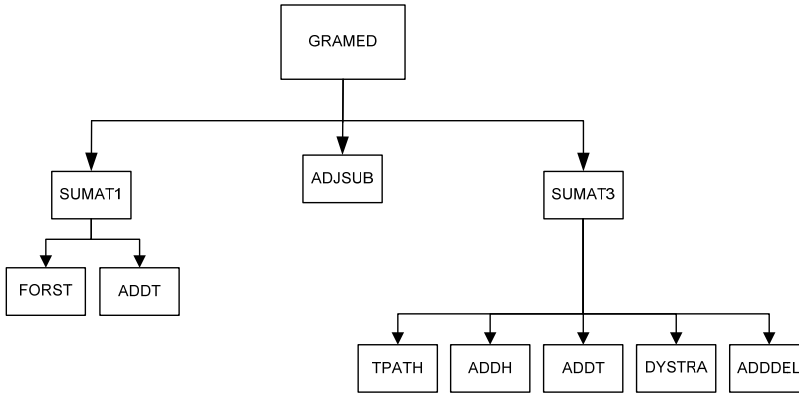
#### 6.3.1 Análise da Observabilidade Topológica

A sub-rotina GRAMED é responsável por montar o grafo de medição para análise da observabilidade topológica e atualizá-lo convenientemente na etapa de determinação de conjuntos críticos. O encadeamento das sub-rotinas utilizadas em GRAMED, a partir das quais será possível concluir sobre a observabilidade do sistema, é ilustrado na Figura 6.2.

Através da sub-rotina SUMAT1 acessa-se a sub-rotina FORST, que tem como função encontrar uma floresta  $F$  do subgrafo de medição formado apenas por medidas de fluxo de potência. A floresta  $F$  encontrada é armazenada em uma lista encadeada, à qual as arestas do grafo são adicionadas por meio da sub-rotina ADDT. Por sua vez, a

eliminação das arestas da lista encadeada, quando necessária, será executada pela sub-rotina DELT.

A sub-rotina ADJSUB forma a lista de adjacência das barras do sistema com medidas de injeção de potência. Esta lista armazena para cada barra com medida de injeção as barras adjacentes. Se a floresta  $F$  não for uma árvore geradora observável, esta lista de adjacência será posteriormente utilizada para definição das arestas de injeção do grafo de medição.



*Figura 6.2 – Sub-rotinas Utilizadas em GRAMED*

Na sub-rotina SUMAT3 inicialmente é verificado se a floresta  $F$  forma uma árvore geradora observável. Em caso contrário, as arestas de injeção de potência devem ser processadas individualmente com o objetivo de expandir  $F$ .

Para cada aresta de injeção processada a sub-rotina TPATH verifica se existe um caminho conectando os dois vértices desta aresta na floresta existente. Se tal caminho existir, TPATH retorna as arestas que o constituem para que, através da sub-rotina ADDH, as arestas de injeção pertencentes ao caminho sejam adicionadas ao grafo bipartido auxiliar  $H$ . Se não existir caminho entre os dois vértices na floresta, e tampouco aresta associada à mesma medida de injeção, então a aresta sob análise é adicionada à floresta.

Nota-se que a sub-rotina ADDH tem função similar à ADDT, entretanto ADDH é utilizada para adicionar arestas à lista encadeada do grafo bipartido auxiliar  $H$ , e não à floresta observável  $F$ .

A sub-rotina DYSTRA executa a busca do menor caminho  $P_{\text{mínimo}}$  entre os conjuntos  $X_P$  e  $X_G$  do grafo bipartido auxiliar  $H$ , através da

utilização do algoritmo de *Dijkstra* (Deo, 1974). Caso DYSTRA encontre  $P_{\text{mínimo}}$ , este caminho terá um número ímpar de arestas. A adição das arestas localizadas nas posições ímpares e a subtração das arestas localizadas nas posições pares à lista encadeada com a estrutura da floresta é realizada pela sub-rotina ADDDEL.

### 6.3.2 Análise de Criticidade de Medidas

As medidas críticas são determinadas pela sub-rotina MEDCRT, cuja estrutura é mostrada na Figura 6.3. Para tanto, além da sub-rotina ADDH, também são utilizadas TREPTH e BUSCA.

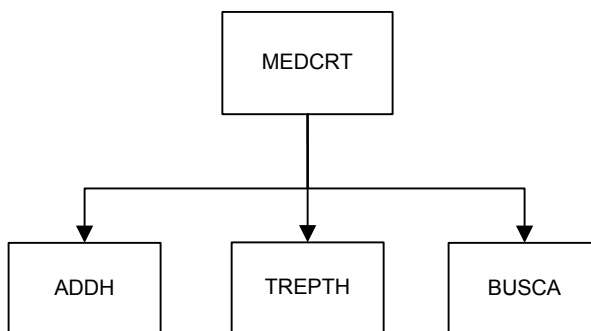


Figura 6.3 – Sub-rotinas Utilizadas em MEDCRT

Sabe-se que a busca por medidas críticas deve restringir-se ao subconjunto das arestas da AGO (Simões Costa e Mandel, 1986). A estratégia utilizada na sub-rotina MEDCRT é rotular todas as arestas pertencentes à AGO como críticas e em seguida, de posse das seqüências de troca existentes, remover este rótulo das arestas que fazem parte das seqüências de troca. Isto se deve ao fato de que, se uma aresta da AGO pertence a uma seqüência de troca, por definição ela pode ser substituída por outra sem prejuízo para a observabilidade.

Neste sentido, a sub-rotina TREPTH tem a função de verificar a existência na AGO de um caminho entre os nós terminais da aresta correspondente a cada um dos vértices contidos em  $V_2$  (conjunto de vértices do grafo bipartido auxiliar  $H$  que corresponde às arestas do grafo de medição que não fazem parte da AGO).

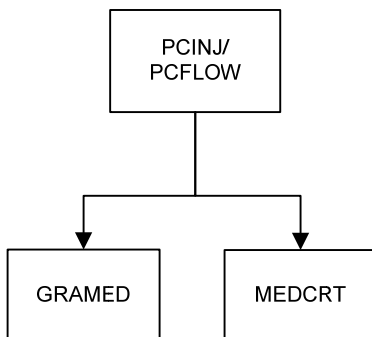
As arestas pertencentes ao caminho encontrado com a sub-rotina TREPTH são adicionadas ao grafo bipartido auxiliar  $H$  através da sub-rotina ADDH.

A procura pelos caminhos de  $X_P$  ( $X_P \subseteq V_2$ ) para  $V_1$  (conjunto das arestas que formam a AGO) fornece as seqüências de troca. Esta busca é executada pela sub-rotina BUSCA.

### 6.3.3 Determinação de Conjuntos Críticos

As sub-rotinas PCINJ e PCFLOW têm por objetivo encontrar os conjuntos críticos através da supressão individual das medidas não-críticas de injeção de potência e de fluxo de potência, respectivamente.

Conforme mostra a Figura 6.4, as sub-rotinas PCINJ e PCFLOW empregam os procedimentos GRAMED e MEDCRT para concluir sobre os conjuntos críticos do plano de medição após a retirada de cada uma das medidas não-críticas sob análise.



*Figura 6.4 – Sub-rotinas Utilizadas em PCINJ e PCFLOW*

## 6.4 AMBIENTE DE PROGRAMAÇÃO E INTERFACE GRÁFICA

### 6.4.1 Ambiente de Programação

O aplicativo PLAMED-F foi implementado na linguagem de programação FORTRAN, utilizando o ambiente de programação Compaq Visual Fortran.

Destaca-se que neste trabalho de dissertação realizou-se uma reestruturação do programa PLAMED existente de modo a tornar mais simples a leitura e compreensão do código e mais prática a manutenção do programa. Além disso, foram substituídos alguns recursos em obsolescência no FORTRAN e comandos cuja utilização atualmente não



é recomendada, como o GO TO, o uso de rótulos (*statement labels*), a declaração implícita do tipo de variáveis, entre outros.

A interface gráfica também foi desenvolvida em FORTRAN, utilizando o ambiente de programação Compaq Visual Fortran e as bibliotecas disponíveis para implementação de programas baseados em janelas de diálogo (*Fortran Windows Application*).

## 6.4.2 Interface Gráfica Desenvolvida

Para facilitar o preenchimento e manipulação dos arquivos de dados utilizados pelo PLAMED-F, foi desenvolvida uma interface gráfica para o usuário. Esta interface dispõe de menus de manuseio intuitivos, auxiliando o usuário desde a edição do arquivo de entrada até a execução do PLAMED-F.

Na Figura 6.5 é mostrada a janela principal da interface gráfica criada para o PLAMED-F.

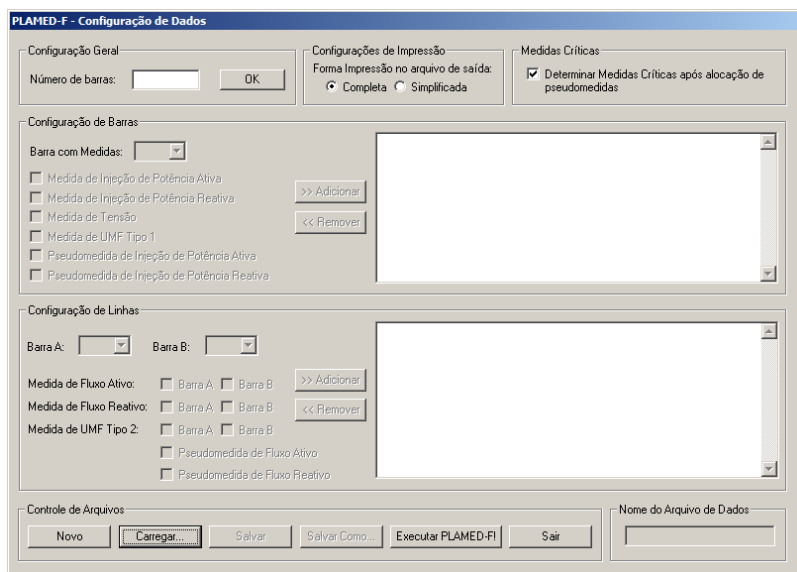


Figura 6.5 – Interface Gráfica Desenvolvida

Através da interface apresentada é possível criar um novo arquivo de dados ou carregar um arquivo-texto existente para edição ou utilização direta, opções disponibilizadas no grupo *Controle de Arquivos*.

Para criar um novo arquivo deve-se iniciar com a definição do número de barras existente no sistema em análise. Em seguida devem ser preenchidos os dados do grupo *Configuração de Barras*, referentes às medidas de injeção de potência, medidas de tensão, medidas de UMF tipo 1 e pseudomedidas de injeção de potência. Para preencher os dados de barras com medidas, o usuário deve selecionar no menu suspenso o número da barra em edição e através das caixas de seleção marcar quais os tipos de medidas estão associados àquela barra. Clicando-se no botão *Adicionar*, a barra configurada é acrescentada na lista mostrada à direita, respeitando o seguinte formato: XXX / IP(S) / IQ(S) / V(S) / UMF1(S) / PSMP(S) / PSMQ(S), onde XXX indica o número da barra sob análise e S representa a existência (Y) ou não (N) de cada tipo de medida nesta barra.

No grupo *Configuração de Linhas* devem ser preenchidos os dados referentes aos ramos do sistema elétrico. Para cada ramo, por meio do menu suspenso são selecionadas as barras terminais Barra A e Barra B, e através das caixas de seleção as medidas de fluxo de potência em cada extremidade do ramo (ou em ambas), os dados correspondentes às medidas de UMF tipo 2 e as pseudomedidas de fluxo de potência. Da mesma forma que no caso das barras, pressionando o botão *Adicionar* os dados configurados são incluídos na lista seguindo o formato: XXX - ZZZ / T:A(S)B(S) / U:A(S)B(S) / UMF2:A(S)B(S) / PSMT(S) / PSMU(S), onde XXX e ZZZ indicam os números das barras terminais do ramo, Barra A e Barra B, respectivamente, e S representa a existência (Y) ou não (N) de cada tipo de medida no ramo.

Observa-se que todas as linhas existentes no sistema elétrico devem ser inseridas através do grupo *Configuração de Linhas*, mesmo aquelas que não tenham medidas associadas, pois são os dados de linha que definem a topologia da rede.

Na parte superior da janela da interface estão disponíveis as *Configurações de Impressão* no arquivo de saída: *Completa* ou *Simplificada*. No arquivo de saída na forma completa são apresentados ao usuário os dados de entrada, a árvore observável encontrada, ou floresta maximal, e impressas as mensagens principais fornecidas pelo programa. A forma de impressão simplificada exhibe apenas as mensagens principais fornecidas pelo programa.

Também na parte superior da janela da interface o usuário pode selecionar em *Medidas Críticas* a opção de determinação de medidas críticas pelo PLAMED-F após a alocação de pseudomedidas para restaurar a observabilidade do sistema, se assim desejar.

Finalmente, no grupo *Controle de Arquivos* o plano de medição criado ou editado pode ser então gravado em arquivo-texto e o programa PLAMED-F executado com a configuração carregada.

Na Figura 6.6 apresenta-se um exemplo de utilização da interface gráfica com o usuário para preenchimento do arquivo de dados de entrada do programa.

**PLAMED-F - Configuração de Dados**

**Configuração Geral**  
 Número de barras: 14 OK

**Configurações de Impressão**  
 Forma Impressão no arquivo de saída:  
☐ Completa ☒ Simplificada

**Medidas Críticas**  
☒ Determinar Medidas Críticas após alocação de pseudomedidas

**Configuração de Barras**  
 Barra com Medidas: 2  
☐ Medida de Injeção de Potência Ativa  
☐ Medida de Injeção de Potência Reativa  
☐ Medida de Tensão  
☒ Medida de UMF Tipo 1  
☐ Pseudomedida de Injeção de Potência Ativa  
☐ Pseudomedida de Injeção de Potência Reativa  
 >> Adicionar << Remover

**Configuração de Linhas**  
 Barra A: 1 Barra B: 2  
☒ Medida de Fluxo Ativo: Barra A ☐ Barra B  
☒ Medida de Fluxo Reativo: Barra A ☐ Barra B  
☐ Medida de UMF Tipo 2: Barra A ☐ Barra B  
☐ Pseudomedida de Fluxo Ativo  
☐ Pseudomedida de Fluxo Reativo  
 >> Adicionar << Remover

**Controle de Arquivos**  
 Novo Carregar... Salvar Salvar Como... Executar PLAMED-F Sair

**Nome do Arquivo de Dados**  
 14BUS.DAD

Figura 6.6 – Exemplo de Utilização da Interface Gráfica

## 6.5 CONCLUSÕES

Neste capítulo são fornecidas informações acerca da implementação computacional do aplicativo PLAMED-F. Este aplicativo permite avaliar planos de medição compostos por medidas fasoriais sincronizadas e medidas convencionais e com resultados não conservadores atestar a observabilidade ou não do plano, bem como identificar medidas e conjuntos críticos.

Por fim é apresentada a interface gráfica para o usuário desenvolvida no presente trabalho, a qual permite uma interação amigável entre programa e usuário facilitando a entrada de dados e a execução do PLAMED-F.



## **CAPÍTULO 7**

### **SIMULAÇÕES E RESULTADOS**

#### **7.1 INTRODUÇÃO**

A fim de validar a extensão do algoritmo de análise de observabilidade e criticidade de medidas desenvolvida no presente trabalho, são apresentados neste capítulo os resultados de diversas simulações realizadas.

Nas simulações são utilizados os sistemas-teste IEEE de 14 barras, 30 barras, 57 barras e 118 barras, os quais são submetidos a planos de medição com medidas fasoriais sincronizadas fornecidas por UMFs do tipo 1 e do tipo 2 e medidas SCADA. Informações sobre os dados de barras e ramos dos sistemas IEEE empregados estão disponíveis em (University of Washington College of Engineering, 1999).

Os resultados das análises realizadas neste capítulo são validados seja por comparação com estudos semelhantes disponíveis na literatura, seja mediante execução de um estimador de estados com capacidade de processamento conjunto de medidas SCADA e medidas fasoriais sincronizadas, conforme indicado em cada caso. Todas as simulações computacionais foram realizadas em um micro computador com processador Intel Core 2 Duo, de 2 GHz, com 2 GB de memória RAM.

## 7.2 RESULTADOS OBTIDOS PARA O SISTEMA IEEE 14 BARRAS

Para o sistema-teste IEEE de 14 barras e 20 ramos, apresentado na Figura 7.1, são estudados três planos de medição observáveis, com medidas tomadas aos pares ativo e reativo:

- **Caso 1** – Plano de medição mínimo para garantir a observabilidade, composto por medidas fornecidas exclusivamente por UMFs do tipo 1 (Dambhare et al., 2008; Xu, Yoon e Abur, 2005);
- **Caso 2** – Plano de medição composto por medidas fornecidas por UMFs do tipo 1, projetado de modo a garantir a observabilidade do sistema na perda de qualquer uma das UMFs instaladas (Dambhare et al., 2008; Xu, Yoon e Abur, 2005). Neste caso modela-se a barra 7 como barra de injeção nula;
- **Caso 3** – Plano de medição composto por medidas fornecidas por UMFs do tipo 2 e medidas SCADA, estas últimas adicionadas ao plano de medição com objetivo de eliminar a ocorrência de medidas críticas.

Na Tabela 7.1 estão detalhados os planos de medição correspondentes a cada caso de estudo proposto.

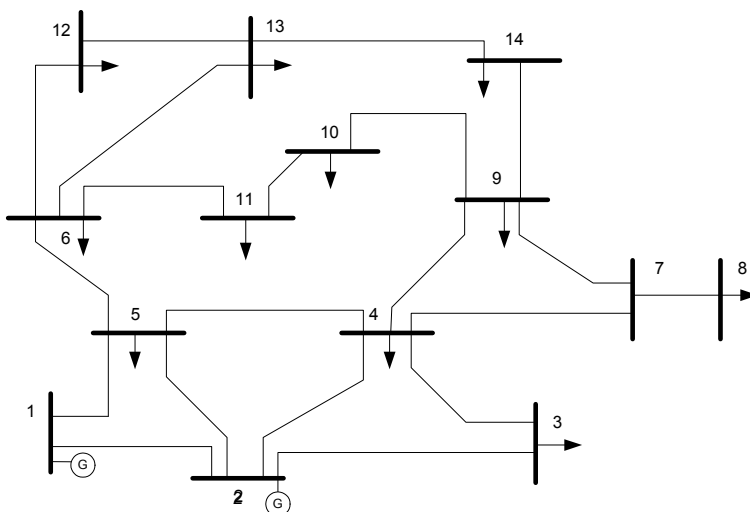


Figura 7.1 – Diagrama Unifilar do Sistema IEEE 14 Barras

*Tabela 7.1 – Planos de Medição para o Sistema IEEE 14 Barras*

<b>Caso</b>	<b>Localização das UMFs</b>	<b>Medidas SCADA</b>
Caso 1	2, 6, 9, 7	-
Caso 2	2, 4, 5, 6, 9, 11, 13	-
Caso 3*	2(2-1), 3(3-4), 5(5-6), 7(7-8), 9(9-14), 10(10-11), 12(12-13)	Injeção: 5, 6, 7 Fluxo: 13-14

\* UMFs tipo 2 monitoram uma medida de tensão fasorial e uma de corrente fasorial

Os resultados da análise de medidas e conjuntos críticos obtidos com o PLAMED-F para os três planos de medição do sistema-teste IEEE 14 barras simulados estão apresentados na Tabela 7.2.

A Figura 7.2 ilustra a AGO associada ao plano de medição observável do Caso 1 fornecida pelo aplicativo PLAMED-F.

*Tabela 7.2 – Resultados da Análise de Criticidade para o Sistema IEEE 14 Barras*

<b>Caso</b>	<b>Medidas Críticas*</b>	<b>Nº de Conj. Críticos</b>
Caso 1	I2-1, I2-3, I6-11, I6-12, I6-13, I7-8, I9-10, I9-14	1
Caso 2	Informação sobre Injeção Nula na Barra 7	6
Caso 3	-	5

\* Ix-y: Medida de corrente fasorial da barra x para a barra y

Nota-se que, caso a barra 7 tivesse sido modelada como barra de injeção nula também no Caso 1, como é feito no Caso 2, isto reduziria para 3 o número mínimo necessário de UMFs a ser instalado no sistema (nas barras 2, 6 e 9) para torná-lo observável. Isto ocorreria porque, nesta situação, a UMF instalada na barra 9 tornaria observável a barra 7, ao passo que a modelagem da barra 7, como barra de injeção nula, permitiria que a barra 8 também se tornasse observável (ver Figura 7.2).

Os resultados da análise de criticidade de medidas evidenciam que o Caso 1, o qual utiliza o número mínimo de UMFs necessário para tornar o sistema observável, apresenta grande quantidade de medidas críticas, como consequência do baixo nível de redundância do plano de medição.

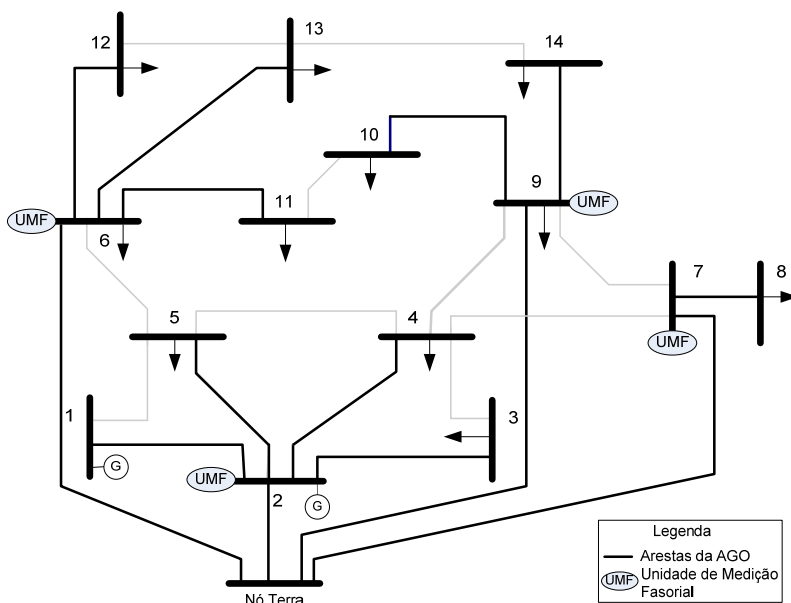


Figura 7.2 – Caso 1: AGO do Sistema IEEE 14 Barras Fornecida pelo PLAMED-F

No Caso 2, o plano de medição é reforçado com o intuito de manter a observabilidade do sistema mesmo na ocorrência de perda de uma UMF. Por conseguinte, a única informação crítica no Caso 2 é a injeção na barra 7, a qual é modelada como barra de injeção nula.

A alocação das UMFs do tipo 2 no Caso 3 garante a observabilidade do sistema (Emami, Abur e Galvan, 2008), porém um plano de medição composto apenas por estas medidas fasoriais de tensão e de corrente implicaria na criticidade de todas as medidas do plano. Com a adição das medidas SCADA propostas no Caso 3 (ver Tabela 7.1), não são identificadas medidas críticas no plano de medição. Em contrapartida, os resultados apontam a existência de 5 conjuntos críticos.

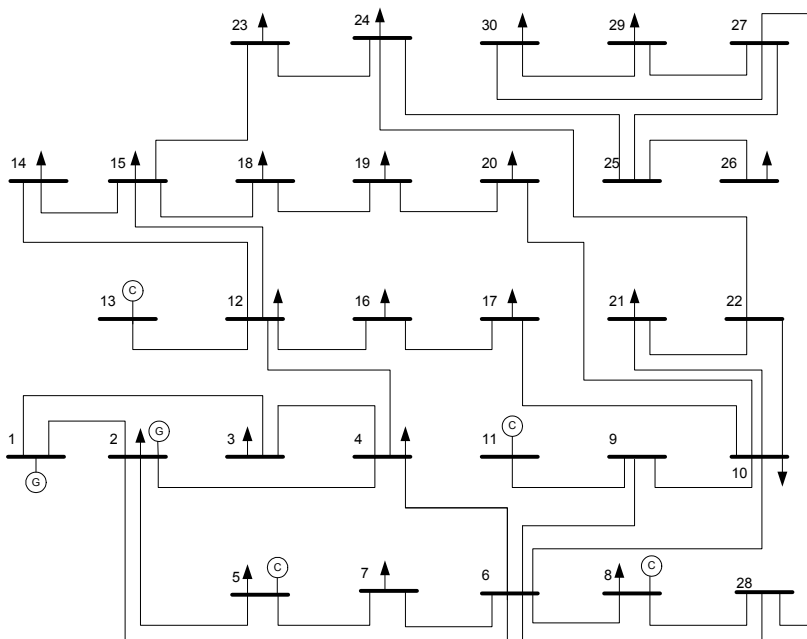
Os resultados de análise de observabilidade topológica obtidos para os três casos estudados foram validados com os trabalhos de Dambhare *et al.* (2008); Xu, Yoon e Abur (2005) e Emami, Abur e Galvan (2008). Com relação às análises de criticidade de medidas, em função da escassez de trabalhos previamente publicados abordando a presença da tecnologia de SMFS no plano de medição, a veracidade das informações apresentada foi averiguada mediante simulações realizadas



com o auxílio de um Estimador de Estados com capacidade de processar medidas fasoriais desenvolvido em (Leites, 2010).

### 7.3 RESULTADOS OBTIDOS PARA O SISTEMA IEEE 30 BARRAS

O diagrama unifilar do sistema-teste IEEE de 30 barras e 41 ramos está apresentado na Figura 7.3.



*Figura 7.3 – Diagrama Unifilar do Sistema IEEE 30 Barras*

Para este sistema-teste, são analisados inicialmente dois planos de medição, sendo um deles não-observável. Para o plano de medição não-observável propõe-se a restauração da observabilidade através da alocação de medidas fasoriais sincronizadas (Caso 3) e através da alocação de medidas convencionais (Caso 4). Todas as medidas são tomadas aos pares ativo e reativo.

- **Caso 1** – Plano de medição observável, composto por um número mínimo de medidas fasoriais de tensão e corrente

fornecidas exclusivamente por UMFs do tipo 2 (Emami, Abur e Galvan, 2008);

- **Caso 2** – Plano de medição não-observável, composto por medidas fornecidas por UMFs do tipo 1 e medidas SCADA.
- **Caso 3** – Plano de medição observável, formado pelas medidas integrantes do Caso 2 e por medidas fornecidas por UMFs do tipo 1;
- **Caso 4** – Plano de medição observável, formado pelas medidas integrantes do Caso 2 e por medidas SCADA.

Os quatro planos de medição analisados para o sistema-teste IEEE 30 barras estão mostrados na Tabela 7.3 e os respectivos resultados da análise de observabilidade e criticidade de medidas obtidos com o PLAMED-F estão apresentados na Tabela 7.4.

*Tabela 7.3 – Planos de Medição para o Sistema IEEE 30 Barras*

<b>Caso</b>	<b>Localização das UMFs</b>	<b>Medidas SCADA</b>
Caso 1*	2(2-1), 4(4-3), 5(5-7), 6(6-8), 9(9-11), 10(10-20), 12(12-13), 14(14-15), 16(16-17), 18(18-19), 21(21-22), 23(23-24), 25(25-26), 27(27-28), 29(29-30)	-
Caso 2	2, 6, 21, 28	Injeção: 1, 9, 19, 22, 26, 30 Fluxo: 2-4, 12-13, 16-17, 22-24, 27-28, 29-30
Caso 3*	2, 6, 10, 15, 21, 25, 28	Injeção: 1, 9, 19, 22, 26, 30 Fluxo: 2-4, 12-13, 16-17, 22-24, 27-28, 29-30
Caso 4	2, 6, 21, 28	Injeção: 1, 9, 12, 15, 19, 22, 24, 26, 30 Fluxo: 2-4, 12-13, 10-20, 14-15, 15-23, 16-17, 19-20, 22-24, 25-27, 27-28, 27-29, 29-30

\* UMFs tipo 2 monitoram uma medida de tensão fasorial e uma de corrente fasorial

*Tabela 7.4 – Resultados da Análise de Observabilidade e Criticidade para o Sistema IEEE 30 Barras*

<b>Caso</b>	<b>Análise de Observabilidade</b>	<b>Medidas Críticas*</b>	<b>Nº de Conj. Críticos</b>
Caso 1	Observável	I2-1, I4-3, I5-7, I6-8, I9-11, I10-20, I12-13, I14-15, I16-17, I18-19, I21-22, I23-24, I25-26, I27-28, I29-30, V2, V4, V5, V6, V9, V10, V12, V14, V16, V18, V21, V23, V25, V27, V29	-
Caso 2	Não-Observável	-	-
Caso 3	Observável	T/U12-13, T/U16-17, T/U29-30, P/Q1, P/Q9, P/Q19, P/Q30, I2-1, I2-5, I6-7, I10-17, I10-20, I15-12, I15-14, I15-18, I15-23, V15	3
Caso 4	Observável	T/U10-20, T/U12-13, T/U14-15, T/U15-23, T/U16-17, T/U19-20, T/U25-27, P/Q1, P/Q9, P/Q12, P/Q15, P/Q19, P/Q24, P/Q26, I2-1, I2-5, I6-7, I6-9	5

\*  $T/U_{x-y}$ : Medida de fluxo de potência ativa e reativa da barra  $x$  para a barra  $y$

$P/Q_x$ : Medida de injeção de potência ativa e reativa na barra  $x$

$I_{x-y}$ : Medida de corrente fasorial da barra  $x$  para a barra  $y$

$V_x$ : Medida de tensão fasorial na barra  $x$

Considerando-se a presença das medidas fasoriais sincronizadas nos quatro casos de estudo, a condição necessária para que o sistema-teste IEEE 30 barras seja observável é que o plano de medição contenha no mínimo 30 medidas (número de estados a serem estimados), tomadas aos pares ativo e reativo, adequadamente distribuídas no sistema.

No Caso 1, cujo plano de medição é constituído por 15 medidas fasoriais de tensão e 15 medidas fasoriais de corrente, observa-se na Tabela 7.4 que apesar do sistema ser observável, todas as medidas do plano são críticas. É importante destacar que um plano de medição com estas características é completamente vulnerável à presença de medidas espúrias, já que medidas críticas apresentam resíduos nulos, tornando

impossível o cálculo do resíduo normalizado e a detectabilidade e identificabilidade de erros grosseiros (Van Cutsem, 1985).

O plano de medição elaborado no Caso 2 é constituído por um total de 32 medidas tomadas aos pares ativo e reativo, distribuídas entre medidas fasoriais sincronizadas e medidas convencionais de fluxo de potência e de injeção. O resultado da análise de observabilidade obtida com o aplicativo PLAMED-F mostra que para o plano de medição do Caso 2 o sistema é não-observável.

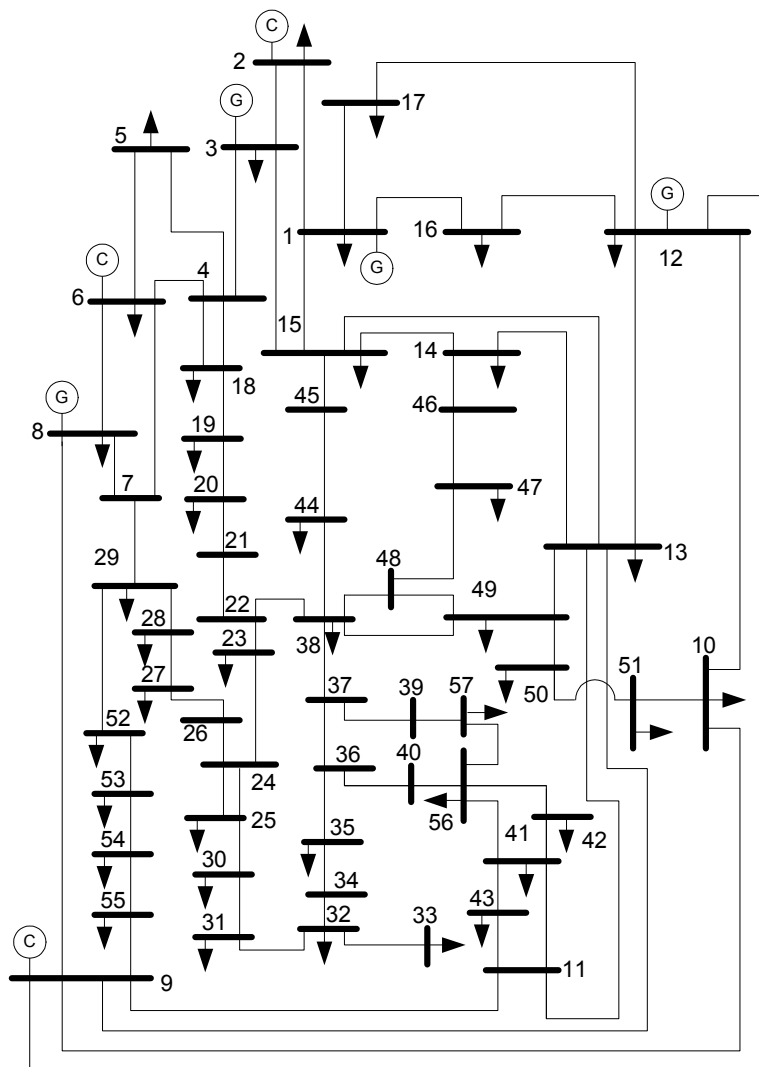
No Caso 3, recupera-se a observabilidade do sistema com a adição ao plano de medição do Caso 2, de UMFs do tipo 1 instaladas nas barras 10, 15 e 25. Contudo, o número de medidas críticas é elevado (16) e verifica-se a existência de 3 conjuntos críticos.

Para garantir a observabilidade do sistema, no Caso 4 o plano de medição não-observável do Caso 2 é reforçado com medidas de injeção de potência ativa e reativa nas barras 12, 15 e 24 e medidas de fluxo de potência ativa e reativa nas linhas 10-20, 14-15, 15-23, 19-20, 25-27 e 27-29. O número de medidas críticas (17) e conjuntos críticos (5) neste plano de medição é ainda mais elevado que aquele do Caso 3, ilustrando a potencialidade do sistema de medição fasorial sincronizada no que diz respeito à observabilidade e criticidade de medidas, no sentido de que com um número menor de UMFs assegura-se a observabilidade do sistema e obtém-se um nível de redundância mais elevado.

Os resultados obtidos para a análise de observabilidade topológica e criticidade de medidas do sistema IEEE 30 barras foram corroborados com relatos da literatura (Emami, Abur e Galvan, 2008) e através de simulações realizadas com o auxílio do Estimador de Estados com capacidade de processar medidas fasoriais desenvolvido em (Leites, 2010).

## 7.4 RESULTADOS OBTIDOS PARA O SISTEMA IEEE 57 BARRAS

O diagrama unifilar do sistema-teste IEEE de 57 barras e 80 ramos é ilustrado na Figura 7.4.



*Figura 7.4 – Diagrama Unifilar do Sistema IEEE 57 Barras*

Os planos de medição analisados para o sistema IEEE 57 barras são observáveis e constituem-se apenas de medidas fornecidas por UMFs do tipo 1. Os dois casos estudados para este sistema são apresentados a seguir e detalhados na Tabela 7.5:

- **Caso 1** – Plano de medição mínimo para garantir a observabilidade, cujas medidas são oriundas de 17 UMFs do

tipo 1 instaladas no sistema (Dambhare *et al.*, 2008; Xu, Yoon e Abur, 2005);

- **Caso 2** – Plano de medição projetado para garantir a observabilidade do sistema na perda de qualquer uma das UMFs do tipo 1 instaladas (Dambhare *et al.*, 2008).

*Tabela 7.5 – Planos de Medição para o Sistema IEEE 57 Barras*

<b>Caso</b>	<b>Nº de UMFs</b>	<b>Nº de Medidas</b>	<b>Localização das UMFs</b>
Caso 1	17	71	1, 6, 9, 15, 19, 22, 25, 26, 28, 32, 36, 38, 41, 47, 51, 53, 57
Caso 2	33	132	1, 3, 4, 6, 9, 11, 12, 15, 19, 20, 22, 24, 26, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 35, 36, 37, 38, 41, 44, 46, 47, 50, 51, 53, 54, 56, 57

Os resultados da análise de criticidade de medidas obtidos com o PLAMED-F para os planos de medição propostos para o sistema IEEE 57 barras são apresentados na Tabela 7.6.

*Tabela 7.6 – Resultados da Análise de Criticidade para o Sistema IEEE 57 Barras*

<b>Caso</b>	<b>Medidas Críticas*</b>	<b>Nº de Conj. Críticos</b>
Caso 1	I1-2, I1-16, I1-17, I6-4, I6-5, I6-7, I9-12, I9-55, I15-3, I15-14, I15-45, I19-18, I19-20, I22-21, I22-23, I25-30, I28-29, I32-31, I32-33, I32-34, I36-35, I36-40, I38-44, I38-49, I41-42, I41-43, I47-46, I51-50, I53-52, I53-54, I57-39 V19, V32, V53	9
Caso 2	-	20

\* Ix-y: Medida de corrente fasorial da barra x para a barra y

Vx: Medida de tensão fasorial na barra x

No Caso 1, a localização proposta para as 17 UMFs do tipo 1 permite que o sistema seja observável utilizando-se o menor número possível de UMFs do tipo 1. Porém, este plano de medição apresenta baixa redundância, sendo observadas 34 medidas críticas e a existência de 9 conjuntos críticos.

No plano de medição do Caso 2, projetado de modo a garantir a observabilidade do sistema mesmo na ocorrência de perda de uma UMF, nota-se que o número de UMFs do tipo 1 necessário é aproximadamente o dobro do caso anterior. Os resultados fornecidos pelo PLAMED-F indicam a existência de 20 conjuntos críticos e de nenhuma medida crítica, conforme esperado.

Ponderar a possibilidade de perda de uma UMF na elaboração do projeto do plano de medição é relevante pois, apesar de altamente confiáveis, as UMFs também estão sujeitas a falhas como qualquer outro dispositivo de medição. Sabe-se que a instalação de uma UMFs do tipo 1 em uma determinada barra torna todas as suas barras adjacentes observáveis. Portanto, para assegurar a observabilidade do sistema em caso de perda de uma UMF é necessário que toda barra seja observada por no mínimo 2 UMFs.

Os resultados alcançados neste item para o sistema-teste IEEE 57 barras são compatíveis com os trabalhos de Dambhare *et al.*, (2008) e Xu, Yoon e Abur (2005). As análises de criticidade de medidas apresentadas foram validadas com o auxílio do Estimador de Estados desenvolvido em (Leites, 2010).

## 7.5 RESULTADOS OBTIDOS PARA O SISTEMA IEEE 118 BARRAS

O sistema-teste IEEE de 118 barras e 179 ramos tem seu diagrama unifilar ilustrado na Figura 7.5, mostrada a seguir.

A análise de observabilidade topológica e criticidade de medidas para o sistema-teste IEEE de 118 barras considerou dois planos de medição, ambos observáveis e com medidas tomadas aos pares ativo e reativo:

- **Caso 1** – Plano de medição mínimo para garantir a observabilidade, composto por medidas fornecidas por UMFs do tipo 1, com um total de 32 UMFs instaladas (Dambhare *et al.*, 2008; Xu, Yoon e Abur, 2005; Mohammadi-Ivatloo e Hosseini, 2008);
- **Caso 2** – Plano de medição sem medidas críticas, obtido pelo reforço do plano de medição mínimo do Caso 1 através da adição de medidas SCADA de injeção e de fluxo de potência.

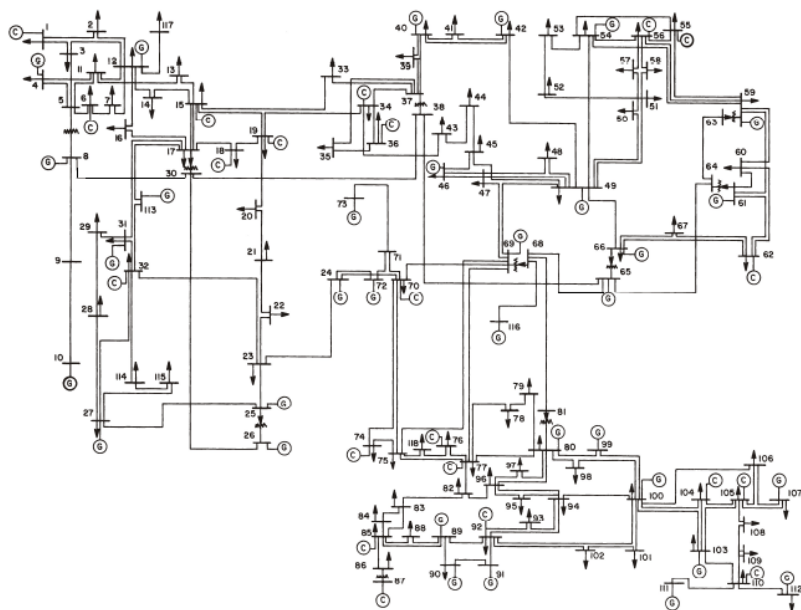


Figura 7.5 – Diagrama Unifilar do Sistema IEEE 118 Barras

Na Tabela 7.7 apresenta-se a localização das UMFs do tipo 1, presentes nos dois planos de medição elaborados para o sistema-teste IEEE 118 barras, bem como as medidas de injeção de potência nas barras e de fluxo de potência nas linhas consideradas no Caso 2.

Tabela 7.7 – Planos de Medição para o Sistema IEEE 118 Barras

Localização das UMFs		3, 5, 9, 12, 15, 17, 21, 23, 28, 30, 36, 40, 44, 46, 51, 54, 57, 62, 64, 68, 71, 75, 77, 80, 85, 86, 91, 94, 101, 105, 110, 114
Medidas SCADA	Medidas de Injeção	5, 12, 15, 17, 25, 37, 40, 49, 51, 54, 72, 78, 85, 92, 96, 100, 105, 110, 118
	Fluxos Monitorados	1-2, 9-10, 19-20, 27-115, 28-29, 34-43, 60-62, 63-64, 66-67, 68-116, 71-73, 75-74, 86-87, 89-90

Os resultados da análise de criticidade de medidas correspondentes aos Casos 1 e 2 são mostrados na Tabela 7.8.



*Tabela 7.8 – Resultados da Análise de Criticidade para o Sistema IEEE 118 Barras*

Caso	Nº de Medidas			Nº de Medidas Críticas	Nº de Conj. Críticos
	SMFS	SCADA	Total		
Caso 1	152	-	152	71	18
Caso 2	152	33	185	-	41

Observa-se que no Caso 1 foram identificadas 71 medidas críticas e 18 conjuntos críticos. O reforço do plano de medição proposto no Caso 2 eliminou a ocorrência de medidas críticas, embora isso tenha implicado no aumento no número de conjuntos críticos (41).

Todas as análises de observabilidade topológica realizadas para o sistema-teste IEEE de 118 barras foram corroboradas por resultados apresentados na literatura técnica pertinente (Mohammadi-Ivatloo e Hosseini, 2008; Dambhare *et al.*, 2008; Xu, Yoon e Abur, 2005). Os resultados referentes à análise de criticidade de medidas foram corroborados com o Estimador de Estados desenvolvido em (Leites, 2010), já que não há registro na literatura de métodos para análise de criticidade com as características apresentadas neste trabalho.

## 7.6 AVALIAÇÃO DO ESFORÇO COMPUTACIONAL

A eficiência de um algoritmo, ou sua complexidade, pode ser medida por meio da definição de um limite superior para o seu tempo de execução expresso como uma função do número de passos realizados. Para o algoritmo de análise de observabilidade, o qual utiliza o método de interseção de matróides, a complexidade do algoritmo é limitada por um polinômio em  $n^3$ , onde  $n$  é o número de vértices do grafo de medição (Frank, 1981; Quintana, Simões Costa e Mandel, 1982).

Entretanto, a fim de avaliar em termos práticos o esforço computacional do aplicativo desenvolvido PLAMED-F, levantou-se o tempo de CPU consumido na execução total do programa para os planos de medição dos sistemas-teste IEEE de 57 e 118 barras analisados nos itens 7.4 e 7.5. Para tanto, utilizou-se uma sub-rotina intrínseca do FORTRAN chamada CPU\_TIME. O tempo fornecido por esta sub-rotina é medido em segundos, porém sua resolução pode ser limitada e dependente de implementação do sistema operacional. Deste modo, enfatiza-se que a utilização da CPU\_TIME neste trabalho visa fornecer

apenas uma perspectiva do tempo de CPU consumido na execução do PLAMED-F.

A Tabela 7.9 apresenta o tempo de CPU consumido na execução total do programa e também o tempo de CPU necessário para a determinação de conjuntos críticos considerando-se os planos de medição mencionados acima.

*Tabela 7.9 – Tempo de CPU Consumido para os  
Sistemas IEEE de 57 e 118 Barras*

<b>Caso</b>		<b>Execução Total do Programa (s)</b>	<b>Determinação de Conjuntos Críticos (s)</b>
IEEE 57 Barras	Caso 1	$< 1,56 \times 10^{-2}$	$< 1,56 \times 10^{-2}$
	Caso 2	$6,24 \times 10^{-2}$	$6,24 \times 10^{-2}$
IEEE 118 Barras	Caso 1	$3,12 \times 10^{-2}$	$3,12 \times 10^{-2}$
	Caso 2	$4,21 \times 10^{-1}$	$4,06 \times 10^{-1}$

Observa-se, através da análise dos resultados apresentados na Tabela 7.9, que o tempo de CPU consumido na execução total do programa em cada caso varia de acordo com a dimensão do sistema e o plano de medição utilizado. Os tempos obtidos, apesar de compatíveis com a aplicação em tempo real, indicam a necessidade de diligenciar esforços na pesquisa de métodos não-enumerativos para a determinação de conjuntos críticos, etapa claramente responsável pelo maior consumo de tempo do programa.

## 7.7 CONCLUSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos com a extensão do algoritmo de análise de observabilidade e criticidade, a qual permite considerar a presença de medidas fasoriais sincronizadas nos planos de medição. As simulações dos sistemas-teste IEEE 14 barras, 30 barras, 57 barras e 118 barras atestam o bom desempenho da metodologia proposta. Os resultados alcançados mostraram-se coerentes com referências da literatura e compatíveis com o processamento do Estimador de Estados desenvolvido em (Leites, 2010). Além disso, na avaliação do esforço computacional empreendida o aplicativo apresentou tempos de execução compatíveis com a aplicação em tempo real.

Destaca-se que, nos planos de medição mínimos propostos para os sistemas-teste IEEE 14, 57 e 118 barras, compostos exclusivamente por medidas oriundas de UMFs do tipo 1, os resultados obtidos corroboram os dados apresentados em (Xu e Abur, 2004; Baldwin *et al.*, 1993) no que diz respeito à necessidade de instalação de UMFs em cerca de 30% das barras para que o sistema seja observável.



## **CAPÍTULO 8**

### **CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS**

#### **8.1 CONCLUSÕES FINAIS**

A Estimação de Estados em Sistemas de Potência é responsável por estimar valores confiáveis para as variáveis de estado do sistema, as quais são dados de entrada para a monitoração e análise da segurança da operação em tempo real. Portanto, a qualidade da estimação de estados é de suma importância para que o processo de operação em tempo real obtenha êxito.

Entretanto, garantir a qualidade da estimação de estados do sistema requer, dentre outros fatores, que exista um número suficiente de medidas adequadamente distribuídas no sistema. A análise de observabilidade tem por objetivo verificar se o conjunto de medidas disponível no plano de medição é suficiente para a estimação de estados do sistema. Caso o sistema se configure como não-observável em tempo real é possível se proceder à estimação de estados das ilhas observáveis, ou alocar pseudomedidas de forma a recuperar a observabilidade do sistema.

A identificação de medidas críticas e de conjuntos críticos na etapa de projeto do plano de medição é de grande valor, pois indica a vulnerabilidade do sistema de medição e em quais pontos ele deve ser reforçado para assegurar a estimação de estados e seu principal atributo: o processamento de erros grosseiros. Em um plano de medição que oferece boas condições de redundância, mesmo na ocorrência de um erro grosseiro este é detectado, identificado e removido, permitindo assim que os estados do sistema sejam corretamente estimados.

Neste sentido, é oportuno destacar a relevância dos estudos envolvendo os Sistemas de Medição Fasorial Sincronizada para os

sistemas elétricos de potência. A aplicação desta tecnologia nos sistemas elétricos apresenta grandes potencialidades nas áreas de monitoração, controle e proteção. Para a estimação de estados, a incorporação de medidas fasoriais sincronizadas, de alta exatidão e taxas de amostragem muito superiores ao sistema SCADA, pode melhorar significativamente os resultados do processo.

Dentre os benefícios do aproveitamento do sistema de medição fasorial sincronizada para o processo de estimação de estados destacam-se, além da qualidade das medidas, a medição direta do ângulo de fase de tensão e de corrente, não disponível no sistema de medição convencional, e a melhoria na redundância do plano de medição. O nível de redundância do plano de medição está relacionado com a análise de observabilidade do sistema e determinará a existência ou não de medidas críticas e conjuntos críticos, contribuindo, portanto, também com o processamento de erros grosseiros.

Assim sendo, é importante que a formulação clássica da estimação de estados em sistemas de potência e os subproblemas associados, como a análise de observabilidade do sistema e de criticidade de medidas, sejam adaptados para incorporar as medidas fasoriais sincronizadas de tensão e de corrente. Visando contribuir com o desenvolvimento de pesquisa nesta área, no presente trabalho de dissertação propõe-se a extensão de um eficiente algoritmo combinatório de análise de observabilidade topológica e de criticidade de medidas, baseado no método de interseção de matróides, de modo que seja possível considerar a presença de medidas fasoriais sincronizadas no plano de medição, além de medidas convencionais.

É apresentada uma revisão qualitativa dos principais conceitos da estimação de estados, observabilidade topológica e uma introdução à tecnologia dos sistemas de medição fasorial sincronizada. São também descritos os principais fundamentos da teoria de matróides aplicada na solução dos problemas de análise de observabilidade topológica e de criticidade de medidas.

Após a abordagem do impacto da presença de medidas fasoriais sincronizadas de tensão e de corrente sobre a estimação de estados e os subproblemas de observabilidade de redes e criticidade de medidas, é apresentado e discutido o tratamento proposto a estas medidas de modo a permitir a extensão do algoritmo sob estudo.

São descritos ainda os aspectos gerais da implementação computacional do algoritmo de análise de observabilidade de redes elétricas e de criticidade de medidas na presença de medidas fasoriais sincronizadas de tensão e de corrente no plano de medição, bem como

da interface gráfica desenvolvida para o usuário, a qual pode auxiliá-lo desde a edição do arquivo de entrada até a execução do programa

Os resultados obtidos para os sistemas-teste de 14 barras, 30 barras, 57 barras e 118 barras do IEEE foram verificados via comparação com resultados similares da literatura ou mediante simulação, tendo sido demonstrada a validade das extensões propostas. O fato do algoritmo utilizado não fazer uso de operações em ponto flutuante contribui para que seus tempos de processamento sejam reduzidos e compatíveis para utilização em ambientes de tempo real.

Finalmente, ressalta-se a possibilidade inédita oferecida pelo método de fornecer as medidas e conjuntos críticos de plano de medição mistos, constituídos por medidas fasoriais e medidas provenientes do sistema SCADA, recurso este ainda não reportado na literatura técnica da área.

## 8.2 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Apresentam-se aqui algumas sugestões para a continuação e aperfeiçoamento deste trabalho de dissertação:

- Desenvolvimento de um procedimento, a ser adicionado ao programa PLAMED-F, que apresente ao usuário sugestões de alocação de medidas convencionais e/ou medidas fasoriais ao plano de medição com o objetivo de restaurar a observabilidade, em casos de sistemas não-observáveis;
- Desenvolvimento de um procedimento, a ser adicionado ao programa PLAMED-F, que apresente ao usuário sugestões de alocação de medidas convencionais e/ou medidas fasoriais ao plano de medição com o objetivo de eliminar a ocorrência de medidas críticas;
- Investigações adicionais acerca do tratamento das medidas fasoriais sincronizadas de corrente nos ramos, visando permitir a utilização do desacoplamento  $P-\delta/Q-V$  na análise de observabilidade topológica;
- Determinação de conjuntos críticos por métodos não-enumerativos, utilizando-se a abordagem de interseção de matrôides;

- Fazer uso dos esforços das pesquisas em andamento sobre métodos numéricos de análise de observabilidade e de criticidade estendidos para considerar a presença de medidas fasoriais sincronizadas visando uma avaliação comparativa dos resultados obtidos através do método topológico de análise de observabilidade apresentado neste trabalho;
- Avaliar a aplicabilidade dos resultados das análises de observabilidade de redes elétricas e de criticidade de medidas propostas nesta dissertação à nova classe de estimadores fundamentada no pós-processamento de estimativas obtidas a partir de medidas SCADA via estimadores baseados exclusivamente em medidas fasoriais sincronizadas (Zhou *et al.*, 2006; Albuquerque, Simões Costa e Bez, 2010; Simões Costa e Albuquerque, 2011).



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abur, A. (2009). *Impact of Phasor Measurements on State Estimation*. ELECO International Conference on Electrical and Electronics Engineering ELECO, Bursa, Turkey, pp. I-3 - I-7.
- Albuquerque, A.; Simões Costa, A.J. e Bez, D. (2010). *Fusão de Estimativas Baseadas nos Sistemas SCADA e de Medição Fasorial para Modelagem em Tempo Real de Sistemas de Potência*. IEEE/PES T&D Latin America Conference and Exposition, São Paulo, Brazil.
- Allemong, J.J.; Irisarri, G.D. e Sasson, A.M. (1980). *An Examination of Solvability for State Estimation Algorithms*. IEEE PES Winter Meeting, New York, paper A80 008-3.
- Ayres, M. e Haley, P.H. (1986). *Bad Data Groups in Power System State Estimation*. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. PWRS-1, No. 3, pp. 1-9.
- Baldwin, T.L.; Mili, L.; Boisen, M.B. e Adapa, R. (1993). *Power System Observability with Minimal Phasor Measurement Placement*. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 8, No. 2, pp. 701-715.
- Castillo, E.; Conejo, A. J.; Pruneda, R. E. e Solares, C. (2006). *Observability Analysis in State Estimation: A Unified Numerical Approach*. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 21, No. 2, pp. 877-886.
- Clements, K.A. e Wollenberg, B.F. (1975). *An Algorithm for Observability Determination in Power System State Estimation*. IEEE PES Summer Meeting, San Francisco, Calif., Paper A 75 447-3.
- Clements, K.A.; Krumpholz, G.R. e Davis, P.W. (1981). *Power System State Estimation Residual Analysis: An Algorithm Using Network Topology*. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, No. 4, pp. 1779-1787.
- Clements, K.A.; Krumpholz, G.R. e Davis, P.W. (1982). *Power System State Estimation with Measurement Deficiency: An Algorithm that*

*Determines the Maximal Observable Subnetwork*. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101, No. 9, pp. 3044-3052.

Clements, K.A.; Krumpholz, G.R. e Davis, P.W. (1983). *Power System State Estimation with Measurement Deficiency: An Observability Measurement Placement Algorithm*. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-102, No. 7, pp. 2012-2020.

Coser, J.; Simões Costa, A.J. e Rolim, J. G. (2006). *Metering Scheme Optimization with Emphasis on Ensuring Bad-Data Processing Capability*. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 21, No. 4, pp. 1903-1911.

Dambhare, S; Rajeev, D.D.; Gajbhiye, K. e Soman S.A. (2008). *Optimal Zero Injection Considerations in PMU Placement: An ILP Approach*. Power Systems Computation Conference, Glasgow, Scotland.

Decker, I.C.; Dotta, D.; Agostini, M.N.; Zimath, S.L. e Silva, A.S. (2006). *Performance of a Synchronized Phasor Measurements System in the Brazilian Power System*. IEEE PES General Meeting, Montreal, Canada.

Decker, I.C.; Agostini, M.N.; Meyer, B.T.. Teodoro, F.H.; Dotta, D e Zimath, S.L. (2009). *Estudo e Avaliação do Desempenho de um Protótipo de Sistema de Medição Fasorial Sincronizada Instalado no Sistema de Transmissão da Eletrosul*. SNPTEE, Recife (PE).

Deo, N. (1974). *Graph Theory with Applications to Engineering and Computer Science*. Prentice Hall, Inc.

EIPP Performance Requirements Task Team (2005). *Definition and Implementation of a System-Wide Phase Angle Reference for Real-Time Visualization Applications*.

Ehrensperger, J.G. (2004). *Sistemas de Medição Fasorial Sincronizada: Análise do Estado da Arte e Aplicações no Monitoramento de Sistemas de Energia Elétrica*. Dissertação de Mestrado, UFSC.

Edmonds, J. e Fulkerson, D.R. (1965). *Transversals and Matroid Partition*. J. Res. Nat. Bur. Standards Sect. 69B, pp. 147-153.

Edmonds, J. (1965). *Minimum Partition of a Matroid into Independent Subsets*. J. Res. Nat. Bur. Standards Sect. 69B, pp. 67-72.

Edmonds, J. (1970). *Submodular Functions, Matroids and Certain, Polyhedra*. Combinatorial Structures and Their Applications, Proceedings of the Calgary International Conference, R. Guy, editor, Gorgon and Breach, New York, pp 69-87.

Edmonds, J. (1979). *Matroid Intersection*. Annuals of Discrete Mathematics, 4, pp. 39-49.

Emami, R.; Abur, A. e Galvan, F. (2008). *Optimal Placement of Phasor Measurements for Enhanced State Estimation: A Case Study*. Power Systems Computation Conference, Glasgow, Scotland.

Frank, A. (1981). *A Weighted Matroid Intersection Algorithm*. Journal of Algorithms 2, pp. 328-336.

Garcia, A; Monticelli, A. e Abreu, P. (1979). *Fast Decoupled State Estimation and Bad Data Processing*. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-98, No. 5, pp. 1645-1652.

Gou, B. e Abur, A. (2000). *A Direct Numerical Method for Observability Analysis*. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 15, No. 2, pp. 625-630.

Handschin, E.; Scheppe, F. C.; Kohlas, J. e Fiechter, A. (1975). *Bad Data Analysis for Power System State Estimation*. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 94, No. 2, pp. 329-337.

Hart, D.G.; Uy, D.; Gharpure, V.; Novosel, D.; Karisson, D. e Kaba, M. (2001). *PMUs – A New Approach to Power Network Monitoring*. ABB Review 1, pp. 58-61.

IEEE Std C37.118™-2005 (2006). *IEEE Standard for Synchrophasors for Power Systems*. New York.

Korres, G.N. e Contaxis, (1991). *Identification and Updating of Minimally Dependent Sets on Measurements in State Estimation*. IEEE Transactions on Power and Systems, Vol. 6, No. 3, pp. 999-1005.

- Korres, G.N; Katsikas, P.J.; Clements, K.A. e Davis, P.W. (2003). *Numerical Observability Analysis Based on Network Graph Theory*. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 18, No. 3, pp. 1035–1045.
- Krumpholz, G.R.; Clements, K.A. e Davis, P.W. (1980). *Power System Observability: A Practical Algorithm Using Network Topology*. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-99, pp. 1534-1542.
- Lawler, E. L. (1970). *Optimal Matroid Intersection*. Combinatorial Structures and Their Applications, Proceedings of the Calgary International Conference, R. Guy, editor, Gorgon and Breach, abstract only, pp.233.
- Lawler, E. L. (1975). *Matroid Intersection Algorithms*. Mathematical Programming, Vol. 9, pp. 31-56.
- Lawler, E. L. (1976). *Combinatorial Optimization: Networks and Matroids*. Holt, Rinehart and Winston, New York.
- Leites, R.A.C. (2010). *Processamento de Medidas Fasoriais de Tensão e Corrente na Estimação de Estados em Sistemas de Potência*. Dissertação de Mestrado, UFSC.
- Lira, R.; Decker, I.C.; Agostini, M.N. e Meyer, B.T. (2010). *Influência dos Canais de Instrumentação na Exatidão da Medição Sincronizada de Fasores*. Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos – SBSE, Belém, Pará.
- Lira, R. (2010). *Influência dos Canais de Instrumentação na Exatidão da Medição Fasorial Sincronizada*. Dissertação de Mestrado, UFSC.
- Madani, V. e Novosel, D. (2008). *Guidelines for Synchronization Techniques Accuracy and Availability*. North American SynchroPhasor Initiative Performance & Standards Task Team.
- Meliopoulos, A.P.; Cokkinides, G.; Fardanesh, B.; Huang, H. *et al*. (2005). *Eastern Interconnection Phasor Project, Part 1 - Targeted Applications: Raw Data Utilization*. Standards and Performance Task Team

Meliopoulos, A.P.; Madani, V.; Novosel, D.; Cokkinides, G. *et al.* (2007). *Synchrophasor Measurement Accuracy Characterization*. North American SynchroPhasor Initiative Performance & Standards Task Team.

Mili, L.; Van Cutsem, T. e Ribbens Pavella, M. (1984). *Hypothesis Testing Identification: A New Method to Bad Data Analysis in Power System State Estimation*. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 103(11).

Mohammadi-Ivatloo, B. e Hosseini S.H. (2008). *Optimal PMU Placement for Power System Observability Considering Secondary Voltage Control*. CCECE/CCGEI, Niagara Falls, Canada.

Monticelli, A. (1999). *State Estimation in Electric Power Systems: A Generalized Approach*. Ed. 1, EUA: Kluwer Academic Publishers.

Monticelli, A. e Wu, F.F. (1985a). *Network Observability: Theory*. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-104, No. 5, pp. 1042-1048.

Monticelli, A. e Wu, F.F. (1985b). *Network Observability: Identification of Observable Islands and Measurement Placement*. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-104, No. 5, pp. 1035-1041.

Monticelli, A. e Wu, F.F. (1986). *Observability Analysis for Orthogonal Transformation Based State Estimation*. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. PWRS-1, No. 1, pp. 201-206.

Moraes, R.M.; Volskis, H.A.R. e Hu, Y. (2008). *Deploying a Large-Scale PMU System for the Brazilian Interconnected Power System*. IEEE International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technology (DRPT), Nanjing, China.

Nuqui, R.F. e Phadke, A.G. (2005). *Phasor Measuremet Unit Placement Techniques for Complete And Incomplete Observability*. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, No. 4.

Phadke, A.G.; Thorp, J.S. e Karimi, K.J. (1986). *State Estimation with Phasor Measurements*. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. PWRS-1, No. 1, pp. 233-238.

Phadke, A.G. (1993). *Synchronized Phasor Measurement in Power Systems*. IEEE Computer Applications on Power Systems, New York, Vol. 6, No. 2, pp. 10-15.

Phadke, A.G. (2002). *Synchronized Phasor Measurements: A Historical Overview*. IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition, pp. 476-479.

Phadke, A.G. (2006). *History and Applications of Phasor Measurements*. IEEE PES Power System Conference and Exposition, Atlanta, GA.

Phadke, A.G.; Thorp, J.S.; Nuqui, R.F. e Zhou, M. (2009). *Recent Developments in State Estimation with Phasor Measurements*. IEEE PES Power System Conference and Exposition, Seattle, WA.

Piazza, T.S. (1989). *Aplicações de Métodos Combinatórios à Estimação de Estados em Sistemas de Potência: Determinação de Medidas e Conjuntos Críticos e Alocação de Pseudomedidas Críticas*. Dissertação de Mestrado, UFSC.

Projeto Medfasee (2009). *Monitoração do SIN em Tempo Real*. [Online] Disponível em <http://www.medfasee.ufsc.br/temporeal/> [Acessado em 19 de Setembro de 2010].

Quintana, V.H.; Simões Costa, A.J. e Mandel, A. (1982). *A Power Systems Topological Observability Using A Graph Theoretic Approach*. IEEE PES Summer Meeting - Paper 81 Sm 452-2, pp. 617-626.

Recski, A. (1989). *Matroid Theory and its Applications in Electric Network Theory and in Statics*. Springer-Verlag, Berlin.

Santos, M.M. (2008). *Análise da Dinâmica de Sistemas Elétricos de Potência Usando Dados de Medição Fasorial Sincronizada*. Dissertação de Mestrado, UFSC.

Schweppe, F.C.; Wildes, J. e Rom, D. (1970). *Power System Static State Estimation: Parts I, II and III*. IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. 89, No. 1, pp 120-135.

Stewart, G. W. (1973). *Introduction to Matrix Computations*. Academic Press, New York.

Simões Costa, A.J. (1981). *Power System State Estimation: Orthogonal Methods for Estimation and Bad Data Processing, and Techniques for Topological Observability*. Ph.D. Thesis, Department of Electrical Engineering, University of Waterloo, Waterloo, Ontario, Canada.

Simões Costa, A.J. e Mandel, A. (1986). *A Abordagem Topológica para Observabilidade de Sistemas de Potência: Teoria e um Algoritmo*. Rev. SBA: Controle e Automação, Vol. 1, No. 1, pp. 59-71.

Simões Costa, A.J. (1988). *Determinação de Conjuntos Críticos de Medidas em Planos de Medição Usados na Estimação de Estados em Sistemas de Potência*. Anais do VII Congresso Brasileiro de Automática, pp. 830-836.

Simões Costa, A.J.; Piazza, T.S. e Mandel, A. (1990). *Qualitative Methods to Solve Qualitative Problems in Power System State Estimation*. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 5, No. 3, pp. 941-949.

Simões Costa, A.J.; Meyer, B.T. e Decker, I.C. (2008). *Análise dos Benefícios de Medições Fasoriais Sincronizadas quanto ao Desempenho da Estimação de Estados em Sistemas de Potência*. XVII Congresso Brasileiro de Automática, Juiz de Fora, Minas Gerais.

Simões Costa, A.J. e Albuquerque, A. (2011). *A Two-Stage Orthogonal Estimator to Incorporate Phasor Measurements into Power System Real Time Modeling*. Power System Computation Conference, Stockholm, Sweden (artigo aceito em Outubro de 2010).

Stott e Alsac (1974). *Fast Decoupled Load Flow*. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-93, No. 3, pp. 859-869.

Thorp, J.S.; Phadke, A.G. e Karimi, K.J. (1985). *Real Time Voltage-Phasor Measurements for Static State Estimation*. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-104, No. 11.

University of Washington College of Engineering (1999). *Power Systems Test Case Archive*. [Online] Disponível em:

<http://www.ee.washington.edu/research/pstca> [Acessado em 17 de Julho de 2010].

Van Cutsem, T. e Gailly, P.J. (1983). *A Simple Algorithm for Power System Observability Analysis and Related Functions*. IFAC Symposium on Control Applications to Power System Security, Florence.

Van Cutsem, T. (1985). *Power System Observability and Related Functions: Derivation of Appropriate Strategies and Algorithms*. Eletrical Power and Energy Systems, Vol. 7, pp. 175-187.

Vanfretti, L.; Chow, J.H.; Sarawgi, S. e Fardanesh, B. (2010). *A Phasor-Data Based State Estimator Incorporating Phase Bias Correction*. IEEE Transactions on Power Systems (artigo aceito em Março de 2010).

Xu, B. e Abur, A. (2004). *Observability Analysis and Measurement Placement for System with PMUs*. Proc. IEEE Power Eng. Soc. Power Systems Conf. Expo., New York.

Xu, B.; Yoon, Y.J. e Abur, A. (2005). *Optimal Placement and Utilization of Phasor Measurements for State Estimation*. Power System Computation Conference, Liege, Belgium.

Zhao, H. (2006). *A New State Estimation Model of Utilizing PMU Measurements*. International Conference on Power System Technology, Chongqing, China.

Zhong, S. e Abur, A. (2005). *Combined State Estimation and Measurement Calibration*. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 20, No. 1.

Zhou, M.; Centeno, V.A.; Thorp, J.S. e Phadke, A.G. (2006). *An Alternative for Including Phasor Measurements in State Estimators*. IEEE Transactions on power Systems, Vol. 21, No. 4, pp. 1930-1937

Zivanovic, R. e Cairns, C. (1996). *Implementation of PMU Technology in State Estimation: An Overview*. Proc. IEEE 4th AFRICON, Vol. 2, pp. 1006-1011.



Zhu, J. e Abur, A. (2007a). *Effect of Phasor Measurements on the Choice of Reference Bus for State Estimation*. Proceedings of the IEEE PES General Meeting, Tampa, FL.

Zhu, J. e Abur, A. (2007b). *Bad Data Identification when Using Phasor Measurements*. IEEE Lausanne Power Tech, Switzerland.